

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)
SPECJALNOŚĆ: Robotyka (ARR)

**PRACA DYPLOMOWA
MAGISTERSKA**

Nawigacja robota mobilnego z użyciem czujników
inercyjnych

Mobile robot navigation using inertial sensors

AUTOR:
Łukasz Tułacz

PROWADZĄCY PRACĘ:
dr inż. Marek Wnuk, I-6

OCENA PRACY:

Pracę dedykuje rodzicom.

*Składam serdeczne podziękowania Panu **dr inż. Markowi Wnukowi** za pomoc oraz czas poświęcony tej pracy. Dziękuję również **mgr inż. Janowi Kędzierskiemu** za wszystkie uwagi techniczne i merytoryczne. Podziękowania składam także **Kołu Naukowemu Robotyków „KoNaR”** za wsparcie finansowe oraz zaplecze techniczne udostępnione w trakcie realizacji pracy.*

Spis treści

1	Wstęp	4
2	Podstawy teoretyczne	5
2.1	Kinematyka robota klasy (2,0)	5
2.2	Wyznaczanie prędkości oraz drogi platformy mobilnej na podstawie przyspieszeń	7
2.3	Wyznaczanie modułu prędkości kątovej platformy mobilnej na podstawie przyspieszenia odśrodkowego	9
2.4	Zjawisko aliasingu oraz metody jego unikania	11
3	Platforma mobilna "BlueScreen V2"	13
3.1	Ogólna charakterystyka robota	14
3.2	Moduł nawigacyjny INS	15
3.2.1	Akcelerometr MMA6270	17
3.2.2	Akcelerometr MMA7455L	18
3.2.3	Żyroskop ADIS16100	20
3.2.4	Analogowy filtr dolnoprzepustowy MAX7400	22
3.2.5	Kompas elektroniczny CMPS-03	24
3.3	Główny sterownik	25
3.4	Wyświetlacz graficzny z panelem dotykowym	26
3.5	Układ napędowy	30
3.6	Zasilanie	33
3.7	Komunikacja	34
3.8	Optyczny czujnik przemieszczenia	36
4	Badania	38
4.1	Wyznaczanie zera i skalowanie akcelerometru analogowego MMA6270	38
4.2	Kompensacja temperaturowa akcelerometru MMA6270 i żyroskopu ADIS16100	39
4.2.1	Przebieg eksperymentu	40
4.2.2	Wyznaczanie tablicy wartości korygujących	41
4.2.3	Wnioski	43
4.3	Wyznaczanie prędkości liniowej oraz przebytej drogi platformy mobilnej przy pomocy akcelerometru	43
4.3.1	Wpływ filtra mechanicznego na akcelerometr MMA6270	45
4.3.2	Wpływ filtra analogowego na akcelerometr MMA6270	47
4.3.3	Wpływ filtra cyfrowego na akcelerometr MMA6270	49
4.3.4	Wpływ filtra cyfrowego na akcelerometr MMA7455L	51
4.3.5	Wpływ sposobu sterowania na akcelerometr MMA7455L	53

4.4	Wyznaczanie prędkości kątowej platformy mobilnej za pomocą akcelerometru	55
4.4.1	Wpływ filtru analogowego na wyznaczenie prędkości kątowej za pomocą akcelerometru MMA6270	55
4.4.2	Wpływ filtru cyfrowego na wyznaczenie prędkości kątowej za pomocą akcelerometru MMA7455L	56
4.5	Wyznaczanie orientacji platformy mobilnej za pomocą żyroskopu	58
4.5.1	Wpływ filtru cyfrowego na wyznaczenie orientacji platformy mobilnej przy pomocy żyroskopu ADIS16100	58
4.5.2	Wpływ sposobu sterowania na wyznaczenie orientacji platformy mobilnej przy pomocy żyroskopu ADIS16100	60
5	Podsumowanie	62
	Bibilografia	63
A	Schematy	66
B	Opis złącz płyty głównej	71
C	Rozmieszczenie elementów na płytkach	75
D	Wymiary robota	82
E	Komendy robota BlueScreen V2	86
F	Przygotowanie stanowiska laboratoryjnego	88
G	Podgląd wyników w programie Matlab	90
H	Przykładowe ćwiczenia laboratoryjne	92
H.1	Wpływ filtracji na wyznaczenie prędkości oraz przebytej drogi przy pomocy akcelerometru	93
H.2	Wpływ filtracji na wyznaczenie modułu prędkości kątowej przy pomocy akcelerometru	94
H.3	Wpływ filtracji sygnałów na wyznaczenie orientacji platformy mobilnej za pomocą żyroskopu	95
I	Zawartość płyty CD	96

Spis tablic

3.1	Opis wyprowadzeń modułu nawigacyjnego	16
3.2	Opis wyprowadzeń akcelerometru MMA6270	17
3.3	Opis wyprowadzeń akcelerometru MMA7455L	18
3.4	Opis wyprowadzeń żyroskopu ADIS16100	21
3.5	Opis bitów tworzących komendy dla żyroskopu ADIS16100	22
3.6	Opis wyprowadzeń filtra dolnoprzepustowego MAX7400	23
3.8	Rejestry modułu kompasu CMPS-03	24
3.7	Opis wyprowadzeń modułu kompasu CMPS-03	25
3.9	Podłączenie wyświetlacza LCD	27
3.10	Opis wyprowadzeń układu AD7843	28
3.11	Oznaczenie bitów komendy dla układu AD7843	29
3.12	Opis bitów wyboru źródła przetwornika w układzie AD7843	30
3.13	Opis złącza płytki kodera AS5040 umieszczonej w serwo mechanizmie	32
3.14	Opis wyprowadzenia modułu Bluetooth BTM-112	35
3.15	Ważniejsze komendy konfiguracyjne modułu BTM-112	36
3.16	Opis złącza optycznego czujnika przemieszczenia	37
B.1	Opis złącz płyty głównej robota BlueScreen V2, cz. 1	73
B.2	Opis złącz płyty głównej robota BlueScreen V2, cz. 2	74
C.1	Spis elementów płyty głównej robota BlueScreen V2	78
C.2	Spis elementów modułu nawigacyjnego	80
C.3	Opis zwor robota BlueScreen V2	81
E.1	Komendy robota BlueScreen V2	87

Rozdział 1

Wstęp

Problem nawigacji robotów mobilnych pojawił się wraz z pierwszymi robotycznymi konstrukcjami. W celu prawidłowego przemieszczania się robota w przestrzeni niezbędna jest wiedza o jego aktualnym położeniu. Zwykle wiedzę tę uzyskuje się poprzez stosowanie różnego rodzaju systemów sensorycznych. Najprostszą i najpopularniejszą metodą jest określanie pozycji na podstawie odometrii. Bardziej rozbudowane systemy pozycjonowania wyposażone są w różnego typu dalmierze, a na podstawie zebranych pomiarów szacują pozycję na mapie. Najbardziej skomplikowane systemy lokalizacji oparte są o wielo-kamerowe systemy wizyjne. W przypadkach kiedy robot porusza się w stałym obszarze zamkniętym używa się specjalnych znaczników radiowych, a w przestrzeniach otwartych dopuszcza się stosowanie systemów GPS. W zależności od tego jak dużej dokładności wymaga się od systemu lokalizacji, stosuje się systemy o odpowiednim stopniu redundancji.

W ostatnich latach pojawiło się wiele tanich czujników inercyjnych takich jak akcelerometry, żyroskopy czy inklinometry. Sensory te wykorzystuje się do budowy systemów INS (*Inertial Navigation System*), które stosowane są do wcześniej wspomnianych metod lokalizacji.

Wykorzystuje się je także w innych dziedzinach, takich jak motoryzacja czy awionika. W motoryzacji wspomaga się systemy nawigacji, np przy zanikach sygnałów GPS w tunelach. W awionice do automatycznego pilotowania.

W ramach tej pracy podjęto próbę budowy modułu INS. Zawiera on dwa akcelerometry, żyroskop i kompas elektroniczny. Dla jednego z akcelerometrów przewidziano filtrację sygnałów na poziomie sprzętowym poprzez zastosowanie scalonego 8-biegunowego filtra dolnoprzepustowego o charakterystyce eliptycznej z regulowaną częstotliwością odcięcia. Działanie modułu przebadano na specjalnie przygotowanej platformie mobilnej klasy (2,0), BlueScreen V2. Robot ten został wyposażony również w inne sensory, takie jak optyczny czujnik przemieszczenia oraz czujniki obrotów kół. Niniejsza praca zawiera wyniki badań polegających na wyznaczeniu położenia i orientacji robota przy użyciu modułu INS oraz porównaniu z wynikami z pozostałych czujników. Badania te przeprowadzono wykorzystując różne metody filtracji sygnałów. Zastosowano filtr mechaniczny, filtr analogowy oraz różne filtry cyfrowe. Zbadano także wpływ temperatury na czujniki modułu INS oraz zastosowano kompensację temperaturową. Praca ta stanowi również kompletną dokumentację wykorzystanej platformy BlueScreen V2. W ramach pracy przygotowano także przykładowe ćwiczenia laboratoryjne, które można przeprowadzić z użyciem opisanego robota.

Rozdział 2

Podstawy teoretyczne

2.1 Kinematyka robota klasy (2,0)

Przyjmując założenie, że robot porusza się bez poślizgów kół, można wyprowadzić ograniczenia fazowe w postaci Pfaffa [1].

$$A(q)\dot{q} = 0. \quad (2.1)$$

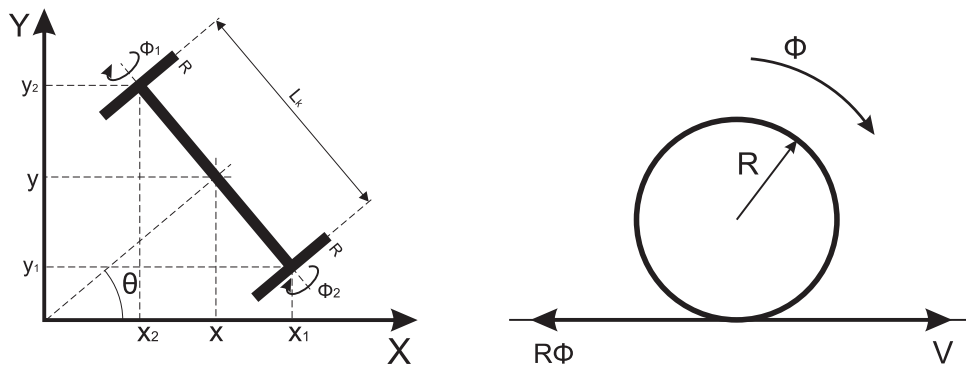
Dla przyjętych założeń, że prędkość w punkcie kontaktu kół z podłożem są równe zero, nie występują poślizgi boczne, wzdłużne oraz buksowanie kół.

Wektor stanu przyjmuje postać:

$$q = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \\ \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}$$

gdzie x, y - współrzędne robota w globalnym układzie współrzędnych, θ - orientacja robota, ϕ_1, ϕ_2 - kąty obrotu kół

Brak poślizgu i buksowania kół oznacza brak prędkości w punkcie styku koła z podłożem (rysunek 2.1). Ograniczenie to zapisano w postaci ogólnej dla i -tego koła jako



Rysunek 2.1 Ruch robota po płaszczyźnie.

$$V_i = R\dot{\phi}_i, \quad (2.2)$$

$$\dot{x}_i = V_i \cos \theta, \quad (2.3)$$

$$\dot{y}_i = V_i \sin \theta. \quad (2.4)$$

W przypadku niespełnienia pierwszej z powyższych równości następuje zjawisko

- $V < R\dot{\phi}$ - buksowanie
- $V > R\dot{\phi}$ - poślizg

Prędkość V to suma prędkości wzdłuż osi x, y oraz prędkości związanej z orientacją robota θ . Dla koła pierwszego wyprowadzenie ograniczenia wygląda następująco

$$x_1 = x + \frac{L_k}{2} \sin \theta, \quad y_1 = y - \frac{L_k}{2} \cos \theta,$$

a po zróżniczkowaniu

$$\dot{x}_1 = \dot{x} + \dot{\theta} \frac{L_k}{2} \cos \theta, \quad \dot{y}_1 = \dot{y} + \dot{\theta} \frac{L_k}{2} \sin \theta.$$

Następnie podstawiając do składowych prędkości \dot{x}_1 oraz \dot{y}_1 równanie (2.2) otrzymuje się

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{\theta} \frac{L_k}{2} \cos^2 \theta - R\dot{\phi}_1 \cos^2 \theta = 0 \quad (2.5)$$

$$-\dot{y} \sin \theta - \dot{\theta} \frac{L_k}{2} \sin^2 \theta + R\dot{\phi}_1 \sin^2 \theta = 0 \quad (2.6)$$

oraz przyrównując do siebie równania (2.5) otrzymano ograniczenie mówiące o braku poślizgu wzdłużnego dla pierwszego koła

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta + \frac{L_k}{2} \dot{\theta} - R\dot{\phi}_1 = 0.$$

Ponieważ drugie koło obraca się w przeciwnym kierunku do koła pierwszego ograniczenie dla tego koła ma postać

$$-\dot{x} \cos \theta - \dot{y} \sin \theta + \frac{L_k}{2} \dot{\theta} + R\dot{\phi}_2 = 0.$$

Ostatecznie można zapisać wszystkie ograniczenia w postaci macierzowej Pfaffa

$$A(q)\dot{q} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & \frac{L_k}{2} & -R & 0 \\ -\cos \theta & -\sin \theta & \frac{L_k}{2} & 0 & R \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{pmatrix} = 0.$$

Z warunku Pfaffa (2.1) wynika, że prędkości kół należą do jądra macierzy $A(q)$, czyli $\dot{q} \in \text{Ker}A(q)$. Należy znaleźć wektory rozpinające to jądro, czyli

$$\dot{q} = G(q)u,$$

gdzie $u \in R^m$, $m = n - l$, n -liczba zmiennych stanu, l -liczba ograniczeń. Macierz $G(q)$ spełnia zatem warunek

$$A(q)G(q) \equiv 0$$

i można ją wybrać w następujący sposób

$$G(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ \frac{2}{L_k} & -\frac{2}{L_k} \\ \frac{2}{R} & 0 \\ 0 & \frac{2}{R} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix},$$

gdzie u_1 to prędkość koła pierwszego, a u_2 to prędkość koła drugiego.

Zatem model kinematyki robota w układzie bezdryfowego sterowania przyjmuje następującą postać:

$$\dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ \frac{2}{L_k} & -\frac{2}{L_k} \\ \frac{2}{R} & 0 \\ 0 & \frac{2}{R} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = G(\theta) u.$$

2.2 Wyznaczanie prędkości oraz drogi platformy mobilnej na podstawie przyspieszeń

Przyspieszenie zależy od zmiany prędkości obiektu, a prędkość zależy od zmiany przemieszczenia tego samego obiektu. Innymi słowy prędkość jest pochodną pozycji, a przyspieszenie jest pochodną prędkości [14].

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}, \quad (2.7)$$

$$\vec{V} = \frac{d\vec{s}}{dt}, \quad (2.8)$$

$$\vec{a} = \frac{d(d\vec{s})}{dt^2}. \quad (2.9)$$

Aby wyznaczyć położenie obiektu na podstawie jego przyspieszenia trzeba użyć dwukrotnego całkowania:

$$V = \int (\vec{a}) dt, \quad (2.10)$$

$$\vec{s} = \int (\vec{V}) dt, \quad (2.11)$$

$$\vec{s} = \int \left(\int (\vec{a}) dt \right) dt. \quad (2.12)$$

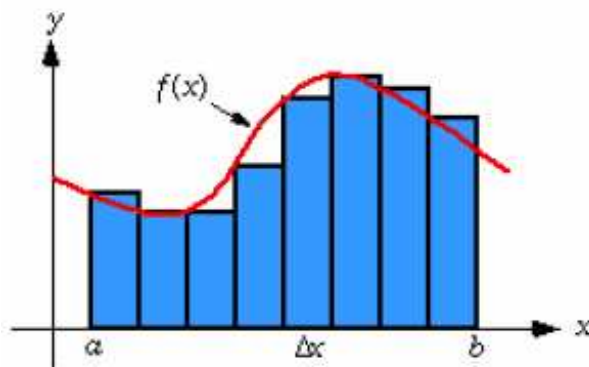
Powyższe rozważania mają sens w przypadku układów ciągłych. W układach dyskretnych pomiary są dokonywane w pewnych odstępach czasu. Jedną z metod całkowania dyskretnego jest metoda prostokątów (rysunek 2.2). W metodzie tej odcinek całkowanej funkcji jest reprezentowany przez zbiór prostokątów, których pola są sumowane. Suma ta

reprezentuje pole pod krzywą (całkę). Im więcej prostokątów występuje w danym przedziale całkowanej funkcji tym dokładniejsza jest metoda [6]. Ilość prostokątów (dokładność całkowania) na ogół jest ograniczona przez częstotliwość układów przetwarzających (przetworniki A/C, mikrokontrolery).

Poniżej przedstawiono wzór na całkowanie metodą prostokątów:

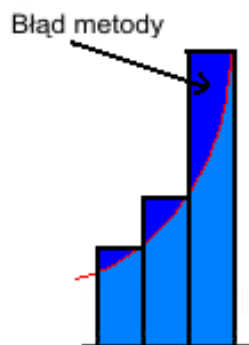
$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(x_i)\Delta x \quad (2.13)$$

$$\Delta x = \frac{b-a}{n} \quad (2.14)$$



Rysunek 2.2 Metoda prostokątów [14]

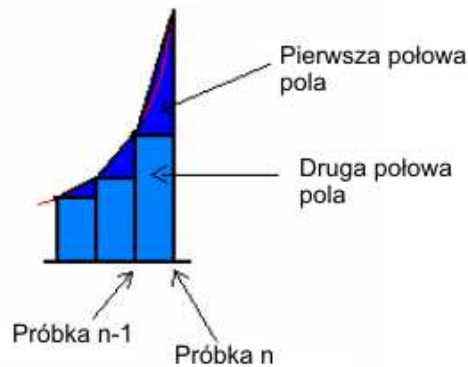
Metoda prostokątów jest jedną z najprostszych metod całkowania dyskretnego przez co generuje błędy. Błędy te rosną wraz ze wzrostem częstotliwości całkowanego sygnału. Wystąpienie błędu metody prostokątów przedstawia rysunek 2.3.



Rysunek 2.3 Błąd metody prostokątów [14]

Nieznaczne zmniejszenie błędów metody prostokątów może spowodować użycie metody całkowania trapezami. Idea całkowania pozostaje taka sama jak w poprzedniej metodzie, a różnica polega na obliczaniu pola dla danej próbki. W metodzie całkowania

trapezami prostokąt reprezentujący daną próbkę dzieli się na dwa pola. Pierwsze pole stanowi prostokąt który mieści się całkowicie pod krzywą, drugie zaś połowa pozostałej części prostokąta (rysunek 2.4). Suma obu pól jest polem odpowiadającym danej próbce. Porównując całkowanie metodą prostokątów i trapezów, zmniejszenie błędu metody uzyskujemy przy całkowaniu trapezowym sygnałów na małych przedziałach. Całkowanie sygnałów na dużych przedziałach jest obarczone błędem na porównywalnym poziomie w obu metodach.



Rysunek 2.4 Metoda całkowania trapezami [14]

Poniżej przedstawiono wzór na pole n -tej próbki zgodnie z rysunkiem 2.4.

$$pole_n = \left(prbka_n + \frac{|prbka_n - prbka_{n-1}|}{2} \right) T \quad (2.15)$$

gdzie T oznacza czas pomiędzy pobraniem dwóch kolejnych próbek. Jeśli czas próbkowania jest stały można przyjąć wartość 1 za T .

2.3 Wyznaczanie modułu prędkości kątowej platformy mobilnej na podstawie przyspieszenia odśrodkowego

Przyspieszenie odśrodkowe dla stałego ruchu po łuku zależy od prędkości kątowej i promienia krzywizny łuku:

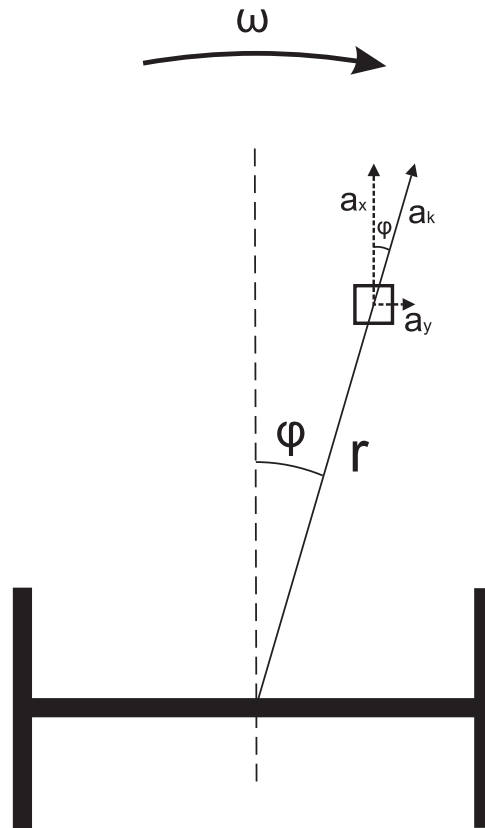
$$a_k = \frac{\omega^2}{r} \quad (2.16)$$

po przekształceniu:

$$|\omega| = \sqrt{ar} \quad (2.17)$$

Ze względu na zależność kwadratową we wzorze 2.16 prędkość kątową możemy otrzymać jedynie w postaci modułu $|\omega|$.

Mierząc przyspieszenia przy ruchu obrotowym akcelerometrem otrzymujemy w ogólnym przypadku dwie składowe (a_x i a_y) przyspieszenia odśrodkowego (rysunek 2.5).



Rysunek 2.5 Wyznaczanie prędkości kątowej z przyspieszenia odśrodkowego

Przyspieszenie odśrodkowe możemy obliczyć wykorzystując składową a_x i znajomość kąta odchylenia akcelerometru od kierunku ruchu postępowego robota φ który jest jednocześnie kątem zawartym pomiędzy składową a_x a wektorem przyspieszenia odśrodkowego a_k które chcemy obliczyć (przy założeniu, że akcelerometr jest zorientowany równoległe do osi kół robota). Dzięki temu możemy je wyliczyć stosując proste przekształcenia trygonometryczne.

$$a_k = \frac{a_x}{\cos \varphi} \quad (2.18)$$

Ostatecznie wzór na moduł prędkości przyjmie postać:

$$|\omega| = \sqrt{\left(\frac{a_x}{\cos \varphi}\right) r} \quad (2.19)$$

Przyspieszenie odśrodkowe możemy również wyliczyć korzystając z obu składowych (a_x i a_y). Wtedy wzór na moduł prędkości kątowej przyjmie postać:

$$|\omega| = \sqrt{\left(\sqrt{a_x^2 + a_y^2}\right) r} \quad (2.20)$$

W ruchu obrotowym, prędkość kątowa jest pochodną orientacji:

$$\omega = \dot{\theta} \quad (2.21)$$

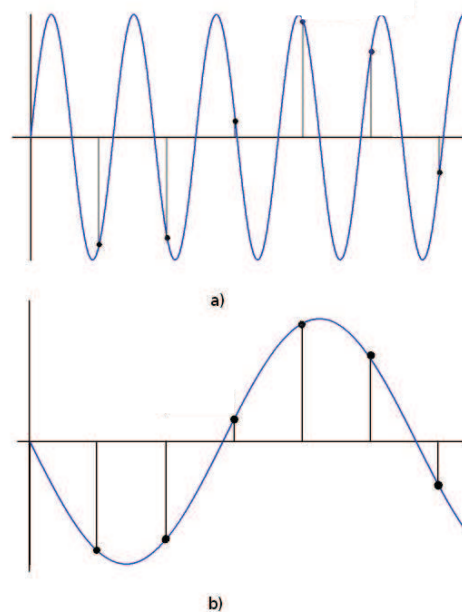
Do wyznaczania orientacji θ , wykorzystuje się całkowanie.

$$\theta = \int \omega dt \quad (2.22)$$

Sposób całkowania dla sygnałów dyskretnych został opisany w rozdziale 2.2.

2.4 Zjawisko aliasingu oraz metody jego unikania

Do przetwarzania sygnałów analogowych na cyfrowe służą przetworniki A/C którym na wejście dostarcza się sygnał ciągły, a którego wyjściem jest ciąg próbek pobieranych z sygnału wejściowego w stałych odstępach czasu. Jednym z podstawowych parametrów procesu próbkowania jest częstotliwość próbkowania, która informuje o liczbie próbek sygnału pobieranych w czasie jednej sekundy.



Rysunek 2.6 Ilustracja zjawiska aliasingu, a - sygnał rzeczywisty, b - sygnał błędnie zinterpretowany

Zjawisko aliasingu jest związane z częstotliwością próbkowania sygnału. W przypadku zbyt niskiej częstotliwości próbkowania, sygnał cyfrowy może być błędnie zinterpretowany, co sprawia że odczytany sygnał cyfrowy nie odzwierciedla sygnału rzeczywistego. Rysunek 2.6 przedstawia przebieg sygnału rzeczywistego oraz błędnie zinterpretowany sygnał spowodowany wystąpieniem zjawiska aliasingu, czyli nałożenia się częstotliwości sygnału próbkowanego i częstotliwości próbkowania. Wynika to z faktu, że sygnał wyjściowy z przetwornika jest zawsze sygnałem o najniższej możliwej częstotliwości jaką da się uzyskać z pobranych próbek.

Zgodnie z twierdzeniem *Shannona - Nyquista*, w celu uniknięcia aliasingu, sygnał musi być próbkowany z częstotliwością większą niż dwukrotność największej częstotliwości występującej w sygnale. Maksymalna częstotliwość sygnału, która może być właściwie zinterpretowana przy określonej częstotliwości próbkowania nazywa się częstotliwością *Nyquista* i jest równa połowie częstotliwości próbkowania. Tak więc znając częstotliwości sygnału

możemy zapobiec wystąpieniu zjawiska aliasingu poprzez zapewnienie odpowiedniej częstotliwości próbkowania. Jednak nie zawsze wiemy jakie maksymalne częstotliwości mogą wystąpić w sygnale lub nie jesteśmy w stanie uzyskać pewnych częstotliwości próbkowania ze względu na ograniczenia wynikające z użytego sprzętu. W takich sytuacjach używa się filtrów dolnoprzepustowych. Eliminują one składowe o wyższych częstotliwościach niż częstotliwości odcięcia filtru. Należy jednak pamiętać, że rozważania te dotyczą filtrów idealnych (idealna charakterystyka przejścia z pasma przenoszenia do pasma tłumienia). Filtry rzeczywiste mają pewne pasmo przejściowe, w którym tłumienie sygnału rośnie wraz z oddalaniem się od częstotliwości odcięcia. Szybkość tego tłumienia zależy od zastosowanego filtru.

Rozdział 3

Platforma mobilna "BlueScreen V2"

Robot "BlueScreen" w pierwszej wersji został skonstruowany w ramach działań w Kole Naukowym Robotyków "KoNaR" przez dwóch studentów: Jana Kędzierskiego oraz Edgara Ostrowskiego. Był również rozwijany w ramach niektórych zajęć projektowych podczas toku studiów wyżej wymienionych studentów.



Rysunek 3.1 Robot BlueScreen w pierwszej wersji [6]



Rysunek 3.2 Robot BlueScreen V2

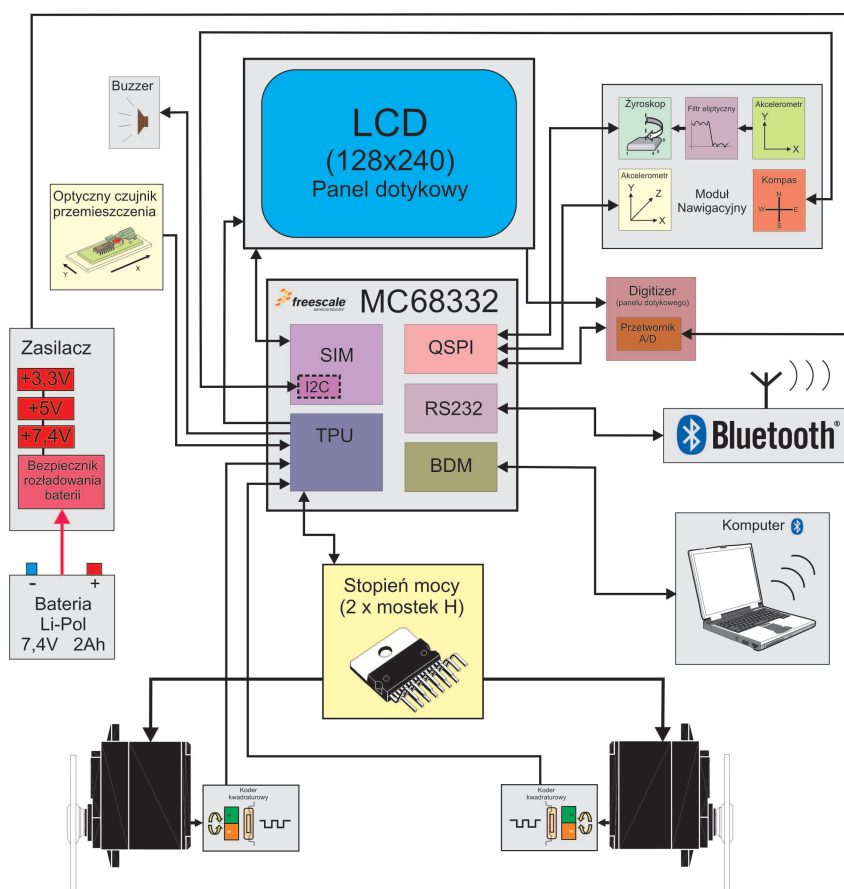
Nazwa pochodzi od dużego, niebieskiego wyświetlacza graficznego, który znajduje się na pokładzie robota. Początkowo funkcjonalność platformy ograniczała się do przeprowadzania na niej badań dotyczących odometrii. Robot posiadał jedynie optyczny czujnik przemieszczenia (z myszki komputerowej) oraz kodery kwadraturowe umożliwiające pomiary kąta obrotu kół. Taki zestaw czujników pozwalał na badanie zjawisk związanych z poślizgami kół. Aby zwiększyć możliwości robota, jego konstruktorzy zamontowali na

pokładzie 2-osiowy akcelerometr. To pozwoliło na zapoznanie się z problemami występującymi podczas określania lokalizacji robota za pomocą czujników inercyjnych oraz zapoczątkowało dalsze badania na ten temat.

W ramach tej pracy robot został przebudowany. Wymieniono oraz zmodyfikowano znaczną część elektroniki oraz rozbudowano robota m.in. o nowe czujniki, a także rozszerzono oprogramowanie platformy. Dokonano także modyfikacji zewnętrznej części obudowy. Zmieniono również nazwę platformy na "BlueScreen V2".

3.1 Ogólna charakterystyka robota

"BlueScreen V2" jest mobilnym robotem kołowym typu *unicycle*. Posiada dwa niezależnie napędzane koła oraz punkt podparcia, który może poruszać się swobodnie w każdym kierunku [5]. Rysunek 3.2 przedstawia wygląd zmodyfikowanego w ramach tej pracy robota natomiast rysunek 3.3 przedstawia, jego schemat blokowy.



Rysunek 3.3 Schemat blokowy robota BlueScreen V2

Główne cechy robota:

- robot klasy (2,0)
- bezprzewodowa komunikacja z komputerem poprzez *Bluetooth*
- wyświetlacz graficzny z panelem dotykowym
- własne zasilanie (Li-Po)

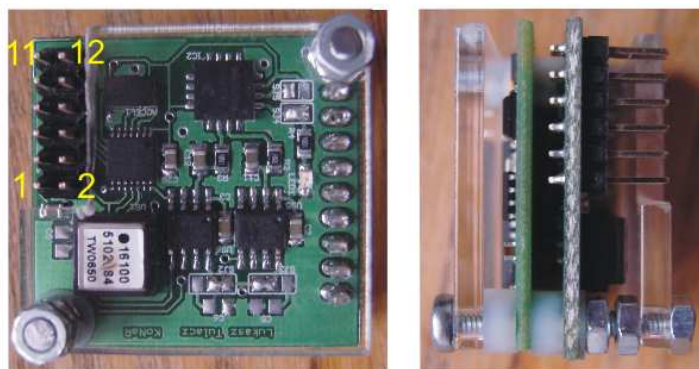
- szeroka gama czujników (akcelerometry, żyroskop, kompas elektroniczny)
- masa 1033g
- czas pracy do 4h bez ładowania
- prędkość maksymalna 0.45m/s

3.2 Moduł nawigacyjny INS

Specjalnie na potrzeby pracy zaprojektowano moduł nawigacyjny INS. Są to dwie małe płytki połączone w taki sposób aby tworzyły "kanapkę" (rysunek 3.4). Moduł scala cztery czujniki, filtr analogowy oraz zasilacz. Dodatkowo zastosowano konwerter napięcia aby dostosować moduł do standardu TTL. Dzięki temu jest to uniwersalny zestaw czujników gotowy do zastosowań w wielu aplikacjach.

Cechy modułu nawigacyjnego:

- zasilanie: +5V,
- komunikacja przez magistrale SPI i I²C,
- wymiary podstawy 32 mm x 34 mm.
- wysokość 20 mm



Rysunek 3.4 Moduł nawigacyjny - opis wyprowadzeń

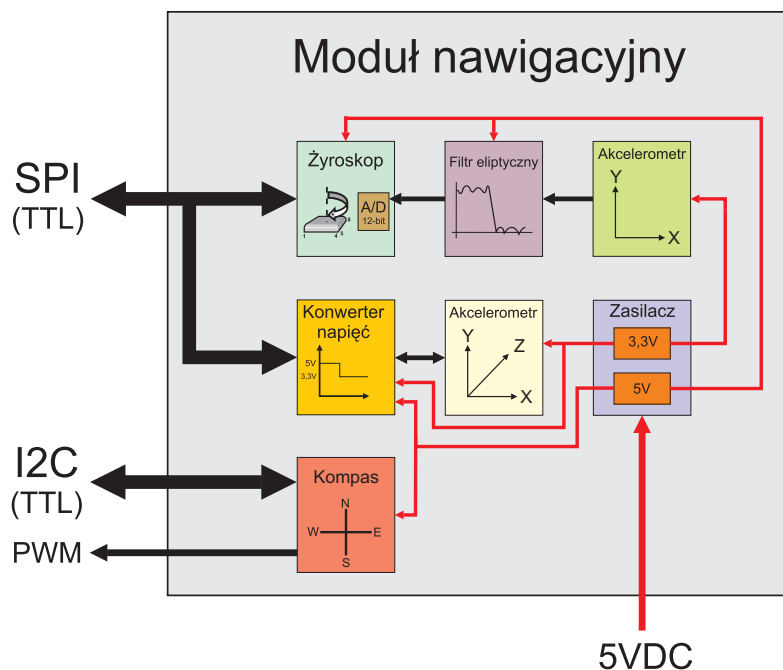
Czujniki wchodzące w skład modułu:

- akcelerometr cyfrowy 3-osiowy MMA7455L
- akcelerometr analogowy 2-osiowy MMA6270 z filtrem dolnoprzepustowym MAX7400
- żyroskop cyfrowy ADIS16100
- kompas elektroniczny CMPS-03

Nr wyp.	Symbol	Opis
1	A2-CLK	wejście zegara ustawiającego częstotliwość odcięcia filtru MAX7400
2	+5V	zasilanie modułu
3	G-CS	wejście wyboru żyroskopu na magistrali SPI
4	GND	masa zasilania modułu
5	DOUT	wyjście danych magistrali SPI
6	CALIBRATE	kalibracja kompasu
7	DIN	wejście danych magistrali SPI
8	C-PWM	wyjście PWM kompasu
9	SCLK	wejście zegara magistrali SPI
10	SDA	dane magistrali I ² C
11	A1-CS	wejście wyboru akcelometru MMA7455L na magistrali SPI
12	SCL	zegar magistrali I ² C

Tabela. 3.1 Opis wyprowadzeń modułu nawigacyjnego

Schemat blokowy modułu nawigacyjnego przedstawiono na rysunku 3.5. Podczas projektowania płytki zwrócono szczególną uwagę na wymiary, aby odpowiadały wymiarom modułu kompasu elektronicznego CMPS-03. Z tego względu należało zadbać żeby płytka nie zawierała zbędnych elementów. Największą oszczędność miejsca umożliwiło wykorzystanie do odczytów akcelometru MMA6270, przetwornika A/C znajdującego się wewnątrz żyroskopu ADIS16100. Cała płytka została zaprojektowana w technologii SMD, co również miało wpływ na osiągnięcie małych wymiarów.

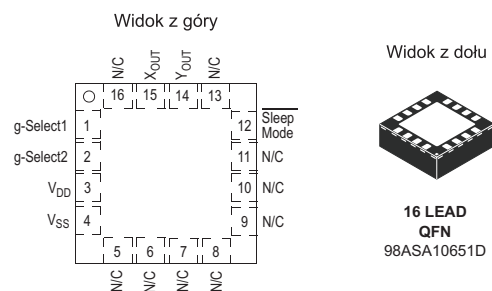


Rysunek 3.5 Moduł nawigacyjny - schemat blokowy

3.2.1 Akcelerometr MMA6270

2-osioowy akcelerometr analogowy firmy *Freescale*. Główne cechy [12]:

- zakres 1.5g / 2g / 4g / 6g
- niski pobór prądu 500 μ A
- napięcie zasilania 2.2 do 3.6V
- wymiary 6 mm x 6 mm x 1.45 mm (QFN)
- czułość 800mV/g przy zakresie 1.5g



Rysunek 3.6 Opis wyprowadzeń akcelerometru MMA6270 [12]

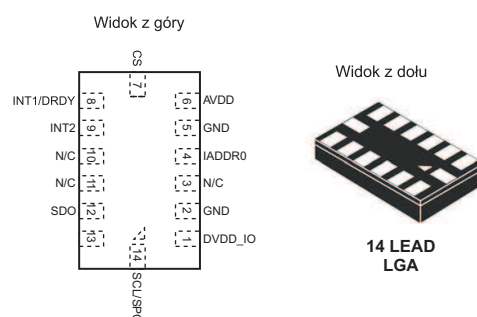
Nr wyp.	Nazwa	Opis
2,1	g-Sel2,g-Sel1	wejścia wyboru zakresu czułości 0,0: 1.5g - 800mV/g 0,1: 2g - 600mV/g 1,0: 4g - 300mV/g 1,1: 6g - 200mV/g
3	V_{DD}	+ zasilania
4	V_{SS}	- zasilania
12	/SleepMode	wejście wymuszające tryb uśpienia
14	Y_{OUT}	wyjście napięciowe osi Y
15	X_{OUT}	wyjście napięciowe osi X
	N/C	niepodłączone

Tabela. 3.2 Opis wyprowadzeń akcelerometru MMA6270

3.2.2 Akcelerometr MMA7455L

3-osiowy akcelerometr cyfrowy firmy *Freescale*. Główne cechy [13]:

- zakres 2g / 4g / 8g
- komunikacja poprzez magistralę SPI lub I²C
- wewnętrzna kompensacja temperaturowa
- wymiary 3 mm x 5 mm x 1 mm (LGA-14)
- napięcie zasilania 2.4V do 3.6V
- czułość 64LSB dla zakresu 2g (także dla zakresu 8g - tryb 10-bit)

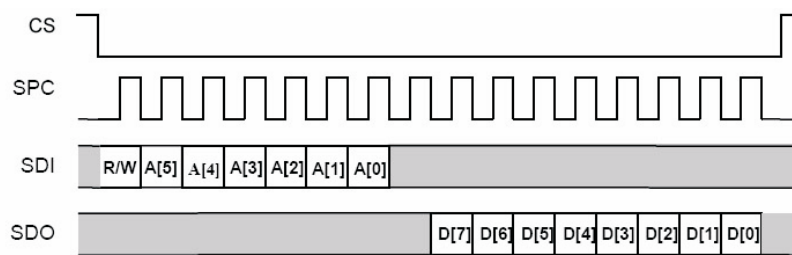


Rysunek 3.7 Opis wyprowadzeń akcelerometru MMA7455L [13]

Nr wyp.	Symbol	Opis
1	DVDD-IO	zasilanie toru cyfrowego
2	GND	masa zasilania
4	IADDR0	wybór adresu bitu 0 magistrali I ² C
5	GND	masa zasilania
6	AVDD	zasilanie toru analogowego
7	CS	wejście wyboru magistrali SPI - 0, I ² C - 1
8	INT1/DRDY	przerwanie 1/dane gotowe
9	INT2	przerwanie 2
12	SDO	wyjście danych magistrali SPI
13	SDA/SDI	dane magistrali I ² C/wejście danych - SPI
14	SCL/SPC	zegar magistrali I ² C/zegar magistrali SPI
	N/C	niepodłączone

Tabela. 3.3 Opis wyprowadzeń akcelerometru MMA7455L

W module nawigacyjnym do komunikacji z akcelerometrem MMA7455L wykorzystano magistralę SPI. Rysunek 3.8 przedstawia sposób wysyłania i odbierania danych. W akcelerometrze tym istnieje możliwość komunikacji za pomocą słów o wielkości 8 lub 16 bitów. W robocie wykorzystano tryb 16-bitowy. Pozwala on na odbieranie aktualnych danych w tym samym cyklu w którym wysyłana jest komenda. Wtedy uwzględnia się



Rysunek 3.8 Komunikacja z akcelerometrem MMA7455L poprzez magistralę SPI [13]

tylko starszą część wysyłanej danej oraz młodszą część odbieranej danej. Komenda zawiera bit R/W który służy do wyboru rodzaju operacji ($R/W = 0$ - czytanie danych z czujnika, $R/W = 1$ - wpisywanie danych do czujnika) oraz numer rejestru z którego chcemy korzystać (czytać/pisać) zajmujący sześć bitów (A[5]-A[0]).

Do najważniejszych rejestrów należą:

- *Mode Control Register* (adres \$16) w którym wybieramy tryb pracy oraz zakres akcelerometru,
- *Control 1* (adres \$18) umożliwiający wybór częstotliwości wewnętrznego filtra cyfrowego (bit DFBW). Filtr może być ustawiony na jedną z dwóch częstotliwości: 62.5Hz oraz 125Hz. Zgodnie z twierdzeniem *Shannona-Nyqusta* częstotliwość odczytywania akcelerometru powinna wynosić minimalnie 125Hz dla pierwszej wartości i 250Hz dla drugiej.
- *8 bits output value* (adres od \$06 do \$08) zawierające 8-bitowe wartości przyspieszeń dla poszczególnych osi.
- *10 bits output value* (adres od \$00 do \$05) zawierające 10-bitowe wartości przyspieszeń dla poszczególnych osi. Wartość dla każdej osi jest zawarta w dwóch 8-bitowych rejestrach. Odczytywanie wartości z tych rejestrów ma sens tylko w przypadku ustawienia akcelerometru na zakres 8g (gwarantuje czułość 64LSB dla 8g). Dla pozostałych zakresów wartości zawsze mieszczą się w danej 8-bitowej.
- *Offset drift value* (adres od \$10 do \$15) przeznaczone do kalibracji zera.

Spis rejestrów oraz dokładny opis czujnika znajduje się w [13].

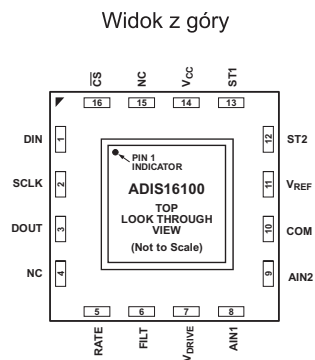
Przydatną funkcją akcelerometru, którą również wykorzystano w robocie jest kalibracja zera. Producenci przewidzieli specjalne rejestry do tego celu, co ułatwia proces kalibracji. Kalibracja zera polega na odczytaniu bieżącej wartości przyspieszenia danej osi oraz wpisaniu jej do odpowiednich rejestrów kalibracji odpowiadających tej samej osi. Operacja ta spowoduje, że wskazania akcelerometru w tej osi będą równe zero dla pozycji, w której ją wykonano. Jeśli czytamy dane 10-bitowe, zawartość rejestrów zawierających młodszą i starszą część wartości przyspieszenia dla danej osi przepisujemy odpowiednio do rejestrów kalibracji, które również składają się z dwóch rejestrów 8-bitowych dla jednej osi. Jednak gdy czytamy pojedyncze 8-bitowe rejestry, wpisywanie ich do rejestrów kalibracji, które składają się z dwóch 8-bitowych rejestrów może być kłopotliwe. Tym bardziej jeśli musimy wpisywać wartości ze znakiem (w kodzie uzupełnienia do 2). Producenci układu wzięli pod uwagę taką sytuację i podali rozwiązanie [15]. Polega ono na wpisywaniu do młodszej części rejestru kalibracji wartości odczytanej z danej osi pomnożonej przez 2.

Starsza część rejestru kalibracji pozostaje bez zmian (nie wpisujemy nic). Taka kalibracja powiedzie się tylko w przypadku kiedy odczytana wartość bieżąca jest ujemna. Dlatego akcelerometr ustawiony poziomo, przed kalibracją wskazuje wartości ujemne.

3.2.3 Żyroskop ADIS16100

1-osiowy żyroskop cyfrowy firmy *Analog Devices*. Główne cechy [18]:

- wewnętrzny 12-bitowy przetwornik A/C (1MSPS)
- wbudowany czujnik temperatury
- napięcie zasilania 5V
- wymiary 8.2 mm x 8.2 mm x 5.2 mm
- czułość $\pm 300^\circ/s$
- komunikacja za pomocą magistrali SPI
- precyzyjne źródło napięcia odniesienia 2.5V



Rysunek 3.9 Opis wyprowadzeń żyroskopu ADIS16100 [18]

Wewnątrz układu znajduje się dolnoprzepustowy filtr RC dla którego umożliwiono zmianę częstotliwości odcięcia poprzez dołączenie kondensatora o odpowiedniej pojemności lub/i rezystora o odpowiedniej rezystancji między wyprowadzenia RATE i FILT układu. Domyślnie częstotliwość odcięcia wynosi 40Hz. Zmiany częstotliwości odcięcia filtru można dokonać korzystając ze wzoru:

$$f_{out} = \frac{1}{2\pi R_{out}(C_{out} + 0.022\mu F)} \quad (3.1)$$

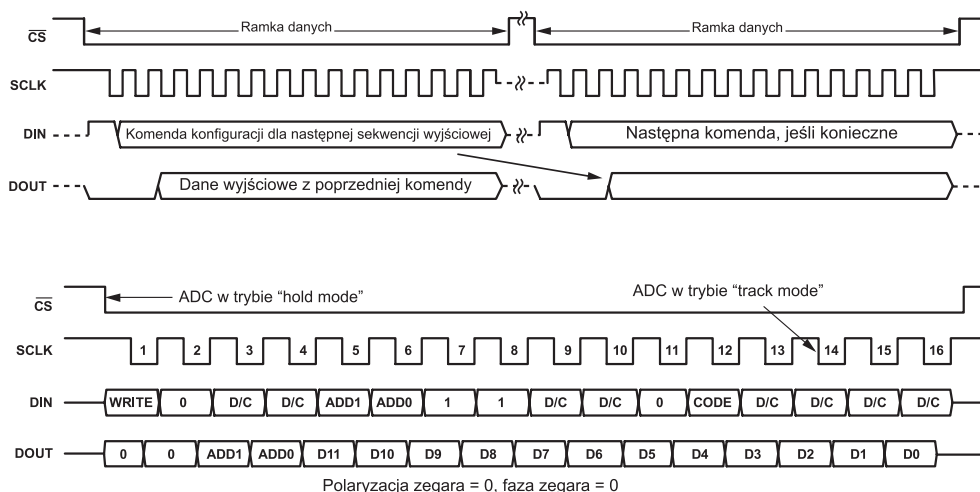
gdzie R_{out} jest rezystancją wewnętrzną zamontowaną fabrycznie i wynosi $180k\Omega$. Rezystancję tę można zmienić dołączając rezystor R_{ext} między wyprowadzenia RATE i FILT układu. Wtedy R_{out} oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$R_{out} = \frac{180k\Omega \cdot R_{ext}}{180k\Omega + R_{ext}} \quad (3.2)$$

Nr wyp.	Symbol	Opis
1	DIN	wejście danych magistrali SPI
2	SCLK	wejście zegara magistrali SPI
3	DOUT	wyjście danych magistrali SPI
5	RATE	wyjście analogowe (sygnał reprezentujący prędkość kątową)
6	FILT	wejście na zewnętrzny kondensator filtrujący
7	V_{DRIVE}	zasilanie interfejsu cyfrowego
8	AIN1	zewnętrzne wejście przetwornika A/C
9	AIN2	zewnętrzne wejście przetwornika A/C
10	COM	masa zasilania
11	V_{REF}	napięcie referencyjne 2.5V
12	ST2	test wewnętrzny
13	ST1	test wewnętrzny
14	V_{CC}	zasilanie toru analogowego
16	/CS	wejście wyboru urządzenia z magistrali SPI
	N/C	niepodłączone

Tabela. 3.4 Opis wyprowadzeń żyroskopu ADIS16100

Komunikacja z układem odbywa się poprzez magistralę SPI w trybie 16-bitowym. Rysunek 3.10 przedstawia sposób transmisji oraz nazwy bitów danych. W każdym cyklu do układu wysyła się ramkę zawierającą komendę i odbiera dane wynikające z wysłania komendy w poprzednim cyklu. Jest to typowy sposób obsługi magistrali SPI przyspieszający transmisję. W tabeli 3.5 przedstawiono opisy poszczególnych bitów tworzących komendy dla żyroskopu ADIS16100.



Rysunek 3.10 Komunikacja z żyroskopem ADIS16100 poprzez magistralę SPI [18]

Żyroskop ADIS16100 posiada wbudowany 12-bitowy przetwornik A/C z funkcją *track-and-hold* który może przetwarzać dane z prędkością do 1MSPS (1 milion próbek/s). Proces konwersji przetwornika jest sterowany przez linie CS i SCLK magistrali SPI. W momencie kiedy na wyprowadzeniu CS pojawia się stan niski, przetwornik wchodzi w tryb *hold mode* i zaczyna próbkować sygnał wejściowy od tego momentu. Po 14 cyklach zegara przetwornik wraca do trybu automatycznego *track mode* (3.10). Do poprawnego

Nr bitu	Nazwa	Opis
15	WRITE	1 - wpisywanie komendy, 0 - komenda nie ważna
14	0	stan niski wymagany dla normalnej pracy
13,12	D/C	nie ma znaczenia
11,10	ADD1,ADD0	wybór źródła dla przetwornika 00: żyroskop 01: czujnik temperatury 10: analogowe wejście zewnętrzne 1 11: analogowe wejście zewnętrzne 2
9,8	1	stan wysoki wymagany dla normalnej pracy
7,6	D/C	nie ma znaczenia
5	0	stan niski wymagany dla normalnej pracy
4	CODE	format danych wyjściowych 0: dane w w kodzie "uzupełnienie do 2" 1: dane w w kodzie binarnym bez znaku
3 do 0	D/C	nie ma znaczenia

Tabela. 3.5 Opis bitów tworzących komendy dla żyroskopu ADIS16100

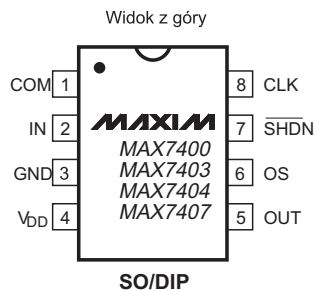
przeprowadzenia konwersji danych przez przetwornik wymaganych jest wszystkie 16 cykli zegara magistrali SPI. W przeciwnym wypadku konwersja nie zostanie ukończona i dane nie zostaną wysłane w następnym cyklu transmisji.

3.2.4 Analogowy filtr dolnoprzepustowy MAX7400

Analogowy filtr dolnoprzepustowy (8-biegunowy) z nastawianą częstotliwością odcięcia o charakterystyce eliptycznej firmy *Maxim*. Główne cechy [16]:

- częstotliwość odcięcia od 1Hz do 10kHz
- filtr 8-biegunowy
- tłumienie -82dB
- niski pobór prądu 2mA ($0.2\mu\text{A}$ w trybie uśpienia)
- napięcie zasilania 5V
- ustawianie częstotliwości odcięcia z oscylatora zewnętrznego lub wewnętrznego poprzez podpięcie kondensatora

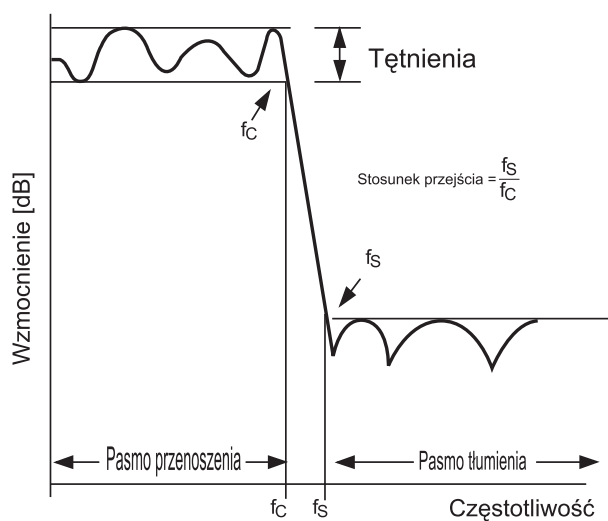
Filtr ten ze względu na eliptyczną charakterystykę i dużą liczbę biegunów wyróżnia się małym stosunkiem przejścia z pasma przenoszenia do pasma tłumienia $r = 1.5$ (strome nachylenie charakterystyki amplitudowej - rysunek 3.12) oraz dużym tłumieniem sygnałów powyżej częstotliwości odcięcia (82dB). Dzięki temu jednym z jego zastosowań jest eliminacja zjawiska aliasingu (zjawisko to zostało opisane w rozdziale 2.4).



Rysunek 3.11 Opis wyprowadzeń filtru dolnoprzepustowego MAX7400 [16]

Nr wyp.	Symbol	Opis
1	COM	COMMON, typowo połączony z masą przez kondensator $1\mu\text{F}$
2	IN	wejście filtru
3	GND	masa zasilania
4	V_{DD}	+5V
5	OUT	wyjście filtru
6	OS	wejście konfiguracyjne (<i>offset</i>)
7	/SHDN	wejście wprowadzające w stan uśpienia
8	CLK	wejście zegara dla zewnętrznego oscylatora. Przy użyciu wewnętrznego oscylatora podłącza się odpowiedni kondensator między CLK i GND

Tabela. 3.6 Opis wyprowadzeń filtru dolnoprzepustowego MAX7400



Rysunek 3.12 Odpowiedź filtru MAX7400 [16]

Częstotliwość odcięcia f_c można ustalać na dwa sposoby. Poprzez doprowadzenie do wyprowadzenia CLK sygnału o odpowiedniej częstotliwości f_{CLK} i wypełnieniu pomiędzy 40% do 60% oraz poprzez przyłączenie kondensatora o odpowiedniej pojemności między wyprowadzenia CLK i GND.

Zależność częstotliwości odcięcia filtru f_c od częstotliwości wejściowej zegara f_{CLK} w przypadku korzystania z zewnętrznego zegara określona jest wzorem:

$$f_c = f_{CLK}/100, \quad (3.3)$$

natomiast w przypadku korzystania z wewnętrznego oscylatora f_{OSC} , f_c oblicza się używając wzorów:

$$f_{OSC}[kHz] = \frac{K \cdot 10^3}{C_{OSC}} \quad (3.4)$$

$$f_c = f_{OSC}/100, \quad (3.5)$$

gdzie K to stała zależąca od rodzaju wykorzystanego filtra (dla MAX7400, $K = 38$), a C_{OSC} [pF] to pojemność kondensatora wpiętego między wyprowadzenia CLK i GND.

3.2.5 Kompas elektroniczny CMPS-03

Moduł kompasu CMPS03 jest układem zaprojektowanym specjalnie do zastosowań w robotyce, głównie do celów nawigacji. Został zbudowany w oparciu o magnetyczne sensory firmy *Philips*, KMZ51 i mikroprocesor PIC16F872 o bardzo niskim poborze prądu. Z modułu odczytuje się kąt obrotu w zakresie $0^\circ - 359.9^\circ$. Główne cechy modułu [20]:

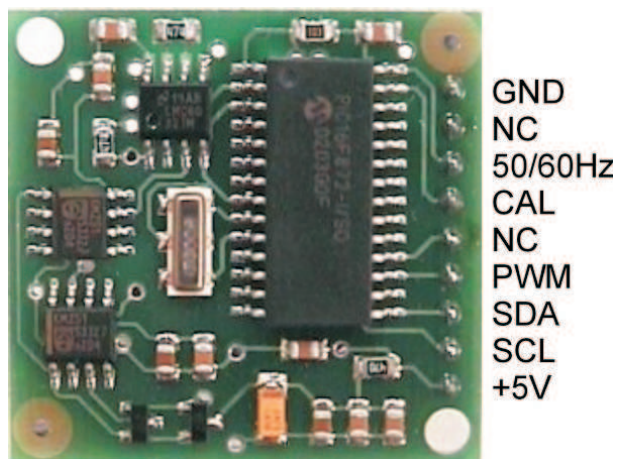
- napięcie zasilania: +5V
- pobór prądu 15mA
- komunikacja poprzez magistralę I²C
- możliwość odczytu kąta z wyjścia PWM
- wymiary 32 mm x 34 mm
- wstępnie przetworzone sygnały

Informacje o aktualnym kącie obrotu możemy uzyskać na dwa sposoby :

- poprzez wyjście PWM, na którym dostępny jest sygnał o czasie trwania impulsu liniowo zależnym od kąta obrotu: od 1ms dla 0° do 36,99ms dla 359.9°
- poprzez odczyt odpowiednich rejestrów mikroprocesora PIC (za pomocą magistrali I²C) w których dostępne są już gotowe, wstępnie przetworzone informacje

Adres	Funkcja
0	numer wersji oprogramowania
1	zgrubna, bajtowa informacja od 0 dla $255 (0^\circ - 359.9^\circ)$
2,3	informacja dokładna w postaci słowa 2 bajtowego od 0 do 3599 ($0^\circ - 359.9^\circ$)
4,5	test wewnętrzny - sensor 1
6,7	test wewnętrzny - sensor 2
8,9	test wewnętrzny - kalibracja wartości sensora 1
10,11	test wewnętrzny - kalibracja wartości sensora 2
15	kalibracja - 0° dla aktualnej pozycji

Tabela. 3.8 Rejestry modułu kompasu CMPS-03



Rysunek 3.13 Kompas CMPS-03, opis wyprowadzeń [20]

Symbol	Opis
GND	masa zasilania modułu
N/C	niepodłączone
50/60Hz	wybór częstotliwości sygnału w sieci elektrycznej
CAL	kalibracja modułu (0° dla aktualnej pozycji)
NC	niepodłączone
PWM	wyjście PWM
SDA	dane magistrali I ² C
SCL	zegar magistrali I ² C
+5V	zasilanie modułu

Tabela. 3.7 Opis wyprowadzeń modułu kompasu CMPS-03

W celu prawidłowego funkcjonowania, moduł kompasu wymaga zamontowania go w pozycji poziomej. Główny sterownik robota komunikuje się z kompasem za pomocą magistrali I²C, z poziomu której układ dostępny jest pod fabrycznie przypisanym adresem C0h.

3.3 Główny sterownik

Jako główny sterownik w robocie wykorzystano moduł EM332 [2] z mikrokontrolerem MC68332 firmy *Motorola* (obecnie *Freescale*). Rysunek 3.14 przedstawia wygląd modułu. Głównymi zaletami wykorzystanego modułu jest 32-bitowa architektura jednostki centralnej (CPU32), programowalny timer (TPU - *Time Processor Unit*) oraz kolejkowy interfejs synchroniczny urządzeń zewnętrznych (QSPI - *Queued Serial Peripheral Interface*). Dokładny opis modułu i mikrokontrolera znajduje się w [2], [11].

Cechy modułu z mikrokontrolerem MC68332:

- 32-bitowa architektura (CPU32),
- częstotliwość taktowania zegara 8 - 25MHz,

- pamięć RAM 256kB,
- pamięć FLASH 128kB,
- moduł transmisji szeregowych (QSM - *Queued Serial Module*),
- programowalny timer (TPU - *Time Processor Unit*),
- kolejkowany interfejs synchroniczny urządzeń zewnętrznych (QSPI - *Queued Serial Peripheral Interface*),
- moduł integracji systemu (SIM - *System Integration Module*),
- napięcie zasilania: +5V.



Rysunek 3.14 Moduł z mikrokontrolerem MC68332 [2]

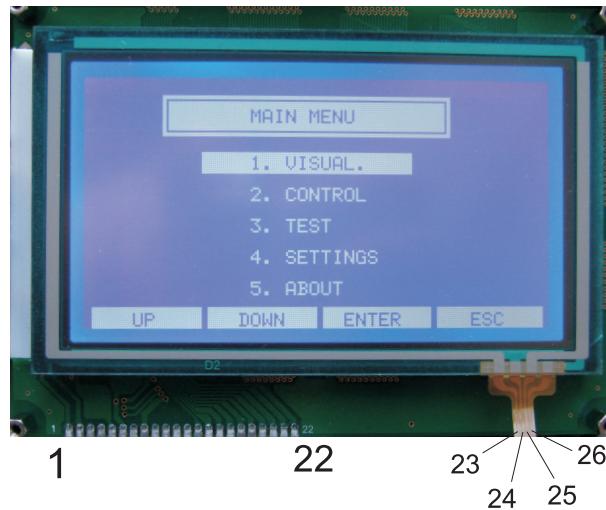
3.4 Wyświetlacz graficzny z panelem dotykowym

Na pokładzie robota znajduje się graficzny wyświetlacz o rozdzielczości 240 x 128 pikseli z panelem dotykowym przeznaczony do wizualizacji wyników pomiarów. Spełnia on również funkcję klawiatury do konfiguracji parametrów robota. Wyświetlacz jest sterowany przez jednostkę centralną poprzez wykorzystanie interfejsu zgodnego z kontrolerem Toshiba T6963C [8]. Dokładny opis obsługi wyświetlacza wraz z fragmentami kodu dla mikrokontrolera MC68332 znajduje się w [7].

Główne cechy wyświetlacza:

- kontroler Toshiba T6963C (SAP1024B)
- wbudowany generator znaków
- rozdzielczość 240 x 128 punktów

- rezystancyjny panel dotykowy
- niebieskie tło, białe znaki
- wymiary całości 144 mm x 104 mm
- podświetlanie

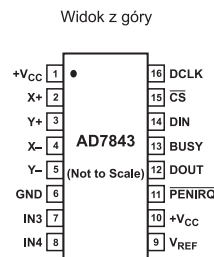


Rysunek 3.15 Opis wyprowadzeń wyświetlacza

Nr wyprowadzenia	Nazwa	Opis
1	A	zasilanie podświetlenia +5V
2	K	masa zasilania podświetlenia
3	Vout	wyj. ujemnego napięcia -15V
4	V0	wej. napięcia ujemnego (np. z dzielnika)
5	PD	wyprowadzenie kontrolne
6	GND	masa kontrolera
7	VDD	zasilanie logiki kontrolera +5V
8	VEE	zasilanie wyświetlacza
9	/WR	aktywny zapis
10	/RD	aktywny odczyt (negator)
11	C/E	wybór wyświetlacza
12	C/D	wybór rejestru (1 - danych, 0 - sterujący)
13	/RST	reset wyświetlacz
14 - 21	DB0...DB9	linie danych
22	FS	wybór czcionki
23	L	panel dotykowy - lewa elektroda
24	B	panel dotykowy - dolna elektroda
25	R	panel dotykowy - prawa elektroda
26	T	panel dotykowy - górna elektroda

Tabela. 3.9 Podłączenie wyświetlacza LCD

Do obsługi panelu dotykowego użyto układu AD7843 firmy *Analog Devices* [17]. Jest to przetwornik A/C (*digitizer*) umożliwiający bezpośrednie podłączenie 4-przewodowego rezystancyjnego panelu dotykowego. Wyprowadzenia układu AD7843 przedstawiono na rysunku 3.16, a ich opis w tabeli 3.10. W układzie znajdują się dodatkowe dwa uniwersalne, zewnętrzne wejścia przetwornika A/C. Jedno z nich zostało wykorzystane do pomiaru napięcia baterii. Układ ma możliwość pracy z rozdzielczością 8 lub 12 bitów. Posiada również wyprowadzenie zgłaszające zewnętrzne przerwanie (PENIRQ) informującego o dotknięciu panelu, oraz wyprowadzenie sygnalizujące stan zajętości przetwornika.



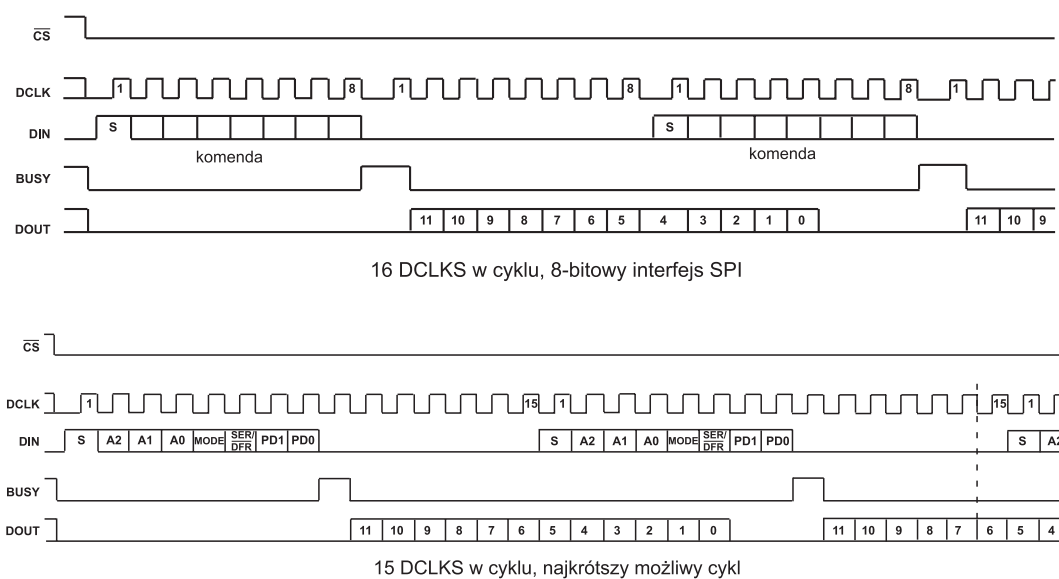
Rysunek 3.16 Opis wyprowadzeń układu AD7843 [17]

Nr wyp.	Nazwa	Opis
1,10	$+V_{CC}$	zasilanie +2.2V do +5.25V. Oba wyprowadzenia powinny być podpięte
2	X+	linia wejściowa X+ panelu, kanał 1 ADC
3	Y+	linia wejściowa Y+ panelu, kanał 2 ADC
4	X-	linia wejściowa X- panelu
5	Y-	linia wejściowa Y- panelu
6	GND	masa układu
7	IN3	zewnętrzne wejście przetwornika, kanał 3
8	IN4	zewnętrzne wejście przetwornika, kanał 4
9	V_{REF}	wejście napięcia referencyjnego (1V do $+V_{cc}$)
11	/PENIRQ	przerwanie zewnętrzne, zgłoszenie dotknięcia panelu
12	DOUT	dane wyjściowe magistrali SPI
13	BUSY	flaga zajętości. Pin ten jest w stanie wysokiej impedancji kiedy CS jest w stanie wysokim
14	DIN	dane wejściowe magistrali SPI
15	/CS	wejście wyboru układu
16	DCLK	wejście zegara magistrali SPI

Tabela. 3.10 Opis wyprowadzeń układu AD7843

Komunikacja z układem odbywa się poprzez magistralę SPI. Istnieje możliwość komunikacji z układem w trybie słów 8 lub 15 bitowych. Na rysunku 3.17 przedstawiono oba warianty. W pierwszym z nich pełen cykl wymiany danych odbywa się przy 16 taktach zegara. Komenda wysyłana jest w co drugim bajcie, a dane odbierane są na bieżąco w dwóch częściach (najpierw starsze 7 bitów potem młodsze 5 bitów). Podobnie sytuacja wygląda w drugim trybie z tym, że pełny cykl komunikacyjny trwa - nietypowo - 15 taktów zegara. Jest to szybszy tryb komunikacji z układem. W tabeli 3.11 przedstawiono znaczenie bitów,

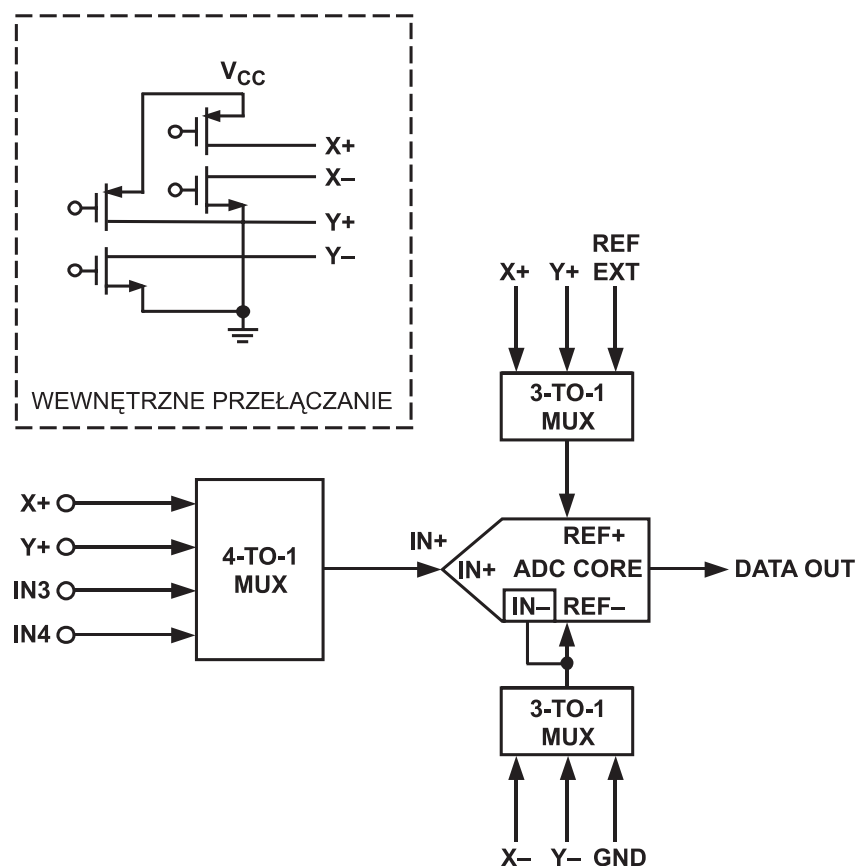
bajtu komendy sterującej układem AD7843. Komenda zawiera bit startu, następnie bity ustawiające kanał przetwornika oraz rozdzielczość przetwarzania, bit SER/DFR oraz dwa bity zarządzania energią (PD1, PD0). Znaczenie bitu SER/DFR przedstawiono w tabeli 3.12 oraz zobrazowano na rysunku 3.18. Jest on związany ze sposobem sygnalizowania czy panel został dotknięty. Jeśli SER/DFR jest w stanie wysokim, napięcia referencyjnego jest pobierane z zewnętrznego źródła poprzez wyprowadzenie V_{REF} układu. Do wejścia przetwornika dociera sygnał z dzielnika napięcia który tworzy zmienna rezystancja panelu dotykowego. Kiedy panel nie jest dotknięty obwód dzielnika pozostaje otwarty, co powoduje wystąpienie na wejściu przetwornika stanu nieustalonego. Dlatego korzystanie z układu w tym trybie ma sens, jedynie z wykorzystaniem wyprowadzenia PENIRQ, które informuje o wystąpieniu dotknięcia panelu. W przypadku ustawienia SER/DFR w stan niski sygnał referencyjny dla przetwornika pochodzi z matrycy dotykowej i nie występuje sytuacja że obwód jest otwarty. Dlatego w tym przypadku odpowiednie wartości wyjściowe przetwornika występują niezależnie od dotknięcia panelu.



Rysunek 3.17 Komunikacja z układem AD7843 za pomocą magistrali SPI [17]

Nazwa	Funkcja
S	bit startowy
A2,A1,A0	bity wyboru źródła dla przetwornika A/C (opisano w tabeli 3.12)
MODE	wybór rozdzielczości przetwornika, 0 - 12-bitów, 1 - 8-bitów
SER/DFR	bit wyboru źródła sygnału referencyjnego
PD1,PD0	bity zarządzania energią układu
	0,0 - układ wchodzi w stan niskiego poboru prądu kiedy nie wykryto dotknięcia panelu, wyprowadzenia przerwania PENIRQ jest nieaktywny
	0,1 - podobnie jak przy ustawieniu poprzednim ale PENIRQ jest aktywny
	1,0 - przetwornik próbkuje cały czas, przerwanie (PENIRQ) nieaktywne
	1,1 - przetwornik próbkuje cały czas, przerwanie (PENIRQ) aktywne

Tabela. 3.11 Oznaczenie bitów komendy dla układu AD7843



Rysunek 3.18 Konfiguracja wewnętrzna układu AD7843 [17]

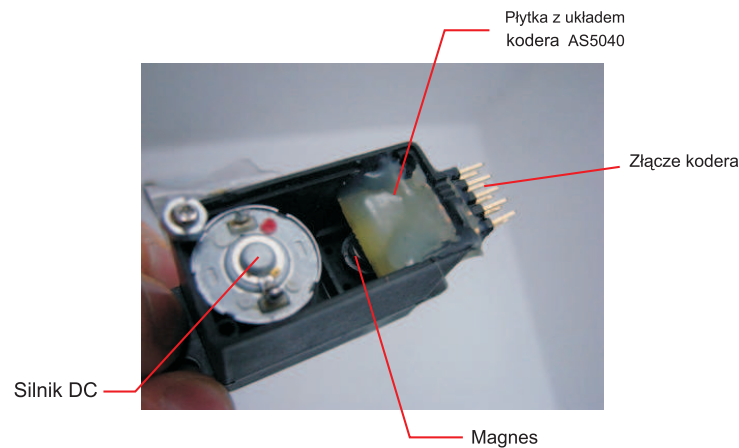
A2	A1	A0	SER/DFR	Wejście analogowe	X	Y	+REF	-REF
0	0	1	1	X+	wył.	zał.	V_{REF}	GND
0	1	0	1	IN3	zał.	wył.	V_{REF}	GND
1	0	1	1	Y+	zał.	wył.	V_{REF}	GND
1	1	0	1	IN4	wył.	wył.	V_{REF}	GND
0	0	1	0	X+	wył.	zał.	Y+	Y-
1	0	1	0	Y+	zał.	wył.	X+	X-
1	1	0	0	identyfikacja układu				

Tabela. 3.12 Opis bitów wyboru źródła przetwornika w układzie AD7843

3.5 Układ napędowy

Układ napędowy jest oparty na serwomechanizmach modelarskich HS985MG firmy *Hi-Tec*, które zmodyfikowano tak aby otrzymać silnik z przekładnią. W tym celu usunięto blokadę mechaniczną oraz elektronikę sterującą. Wewnątrz każdego serwomechanizmu zamontowano płytkę z magnetycznym koderem kwadraturowym AS5040 firmy *Astriamicrosystems*, umożliwiającym precyzyjny, bezstykowy pomiar kąta obrotu kół. Rysunek 3.19

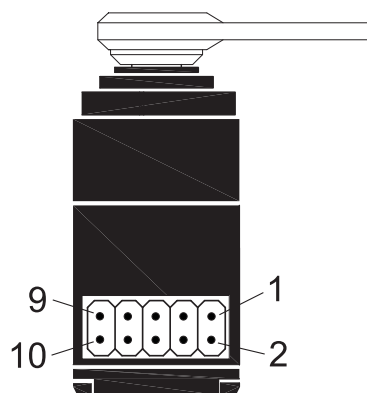
przedstawia wygląd zmodyfikowanego serwomechanizmu. Dokładny opis układu AS5040 znajduje się w [3] i [21].



Rysunek 3.19 Zmodyfikowany serwomechanizm modelarski [5]

Główne cechy układu napędowego:

- bezrdzeniowe silniki typu corless (mała bezwładność)
- metalowe przekładnie z podwójnym łożyskowaniem
- moment siły 8.6 kg · cm
- szybkość 60°/0.13 s
- koder umieszczony na wale koła napędowego
- bezstykowy pomiar obrotów
- rozdzielczość kodera 10 bitów
- 2 × 256 impulsów/obrót (tryb wyjść kwadraturowych)



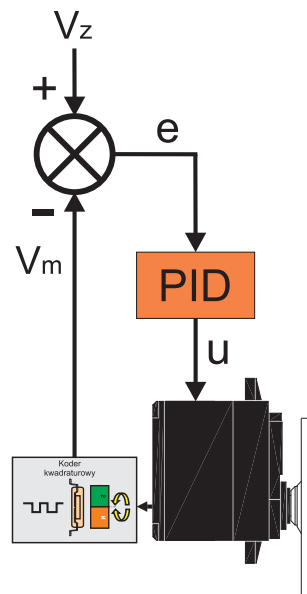
Rysunek 3.20 Złącze płytki kodera AS5040 umieszczonej w serwomechanizmie

Nr wyp.	Nazwa	Opis
1	VDD5V	zasilanie układu +5V
2	GND	masa układu
3	PWM-LSB	tryb 1, 2: Wyjście PWM 1kHz tryb 3: LSB (Impuls)
4	A-LSB-U	tryb 1: kanał A (wyj. kwadraturowe) tryb 2: impuls (impuls/kierunek) tryb 3: pierwsza faza U (komutator)
5	CSn	wyjście oscylatora
6	B-DIR-V	tryb 1: kanał B (wyj. kwadraturowe) tryb 2: kierunek (impuls/kierunek) tryb 3: druga faza V (komutator)
7	CLK	wejście zegara szeregowego interfejsu komunikacyjnego
8	INDEX-W	tryb 1, 2: impuls indeksujący tryb 3: trzecia faza W (komutator)
9	DO	wyjście danych szeregowego interfejsu komunikacyjnego
10	PROG	wejście napięcia programującego

Tabela. 3.13 Opis złącza płytki kodera AS5040 umieszczonej w serwomechanizmie

Zastosowanie magnetycznych koderów kwadraturowych, poza pomiarem przemieszczenia umożliwiło stabilizację prędkości obrotowych kół poprzez implementację regulatorów PID. Regulatory dla każdego działają niezależnie. Rysunek 3.21 przedstawia regulator PID dla jednego koła. Fragmenty kodu implementacji algorytmu PID dla mikrokontrolera MC68332 znajduje się w [5]. Algorytm ma postać:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6)$$



Rysunek 3.21 Regulator PID układu napędowego

3.6 Zasilanie

Na pokładzie robota znajduje się akumulator litowo-polimerowy. Jest to pakiet z dwoma ogniwami firmy *Kokam* o pojemności 2Ah i napięciu znamionowym 7,4V. Akumulator jest umieszczony w robocie na stałe, a ładowanie odbywa się poprzez zewnętrzne złącze (rysunek 3.22). Do ładowania akumulatora należy używać wyłącznie ładowarek przeznaczonych dla akumulatorów tego typu, np. Li-Po charger 4 firmy *Graupner*. Należy pamiętać, że ładowanie jest możliwe tylko kiedy robot jest wyłączony (wyłącznik zasilania przełączony w kierunku złącza ładowarki).

Główne cechy akumulatora:

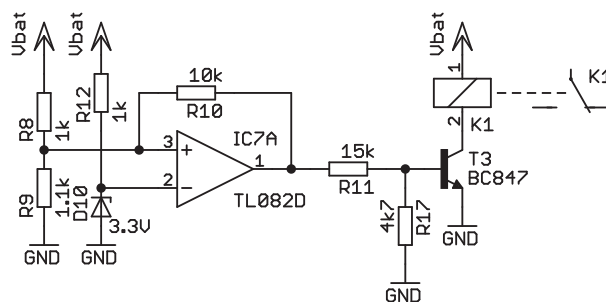
- rodzaj akumulatora litowo-polimerowy
- napięcie znamionowe 7,4V
- minimalne napięcie rozładowania 6V
- maksymalne napięcie naładowania 8.4V
- pojemność 2Ah
- maksymalny prąd ładowania 2A
- maksymalny prąd rozładowania 30A
- wymiary 16 mm x 42 mm x 78 mm



Rysunek 3.22 Tylny panel robota BlueScreen V2

Akumulatory litowo-polimerowe są czułe na rozładowanie poniżej napięcia progowego i mogą w ten sposób ulec trwałemu uszkodzeniu. Dlatego stosuje się układy kontroli napięcia. W robocie BlueScreen V2 również zastosowano taki układ. Jego zadaniem jest ciągły pomiar napięcia akumulatora i odcięcie zasilania w przypadku spadku napięcia poniżej 6V. Zaletą układu jest niezależne (sprzętowe) działanie. Fragment schematu robota zawierający układ kontroli napięcia zasilania przedstawiono na rysunku 3.23. Głównym elementem układu jest wzmacniacz operacyjny pracujący w układzie komparatora. Napięcie odniesienia komparatora uzyskano poprzez podpięcie do wejścia odwracającego wzmacniacza diody zenera. Porównywane napięcie akumulatora poprzez dzielnik napięcia utworzony przez rezystory R8,R9 trafia do wejścia nieodwracającego wzmacniacza.

Użycie rezystora R10 zapewnia histerezę układu na odpowiednim poziomie (0.5V). Jako element wykonawczy użyto miniaturowy przekaźnik.



Rysunek 3.23 Schemat układu odcięcia zasilania

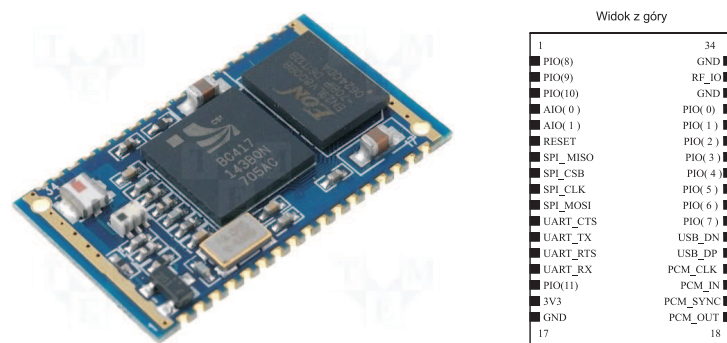
3.7 Komunikacja

Komunikacja robota z komputerem odbywa się poprzez *Bluetooth*, korzystając z profilu obsługi portu szeregowego w standardzie RS232. W celu ułatwienia komunikacji w robocie zaimplementowano kolejkę FIFO (*First In First Out*). Dokładny opis kolejki wraz z fragmentami kodu dla mikrokontrolra MC68332 znajduje się w [9]. Transmisja przez *Bluetooth* w standardzie RS232 jest możliwa dzięki zastosowaniu przeźroczyściego dla transmisji szeregowej, modułu BTM-112 (rysunek 3.24).

Główne cechy modułu BTM-112 [19]:

- bluetooth 2.0
- zasięg 10m (klasa 2)
- napięcie zasilania 3V - 3.6V
- interfejs UART, USB, PCM (transmisja sygnałów audio)
- obsługa protokołu SPP (*Serial Port Profile*) z komendami AT
- wymiary 25 mm x 14.5 mm x 2.2 mm

Moduł BTM-112 ma kilka interfejsów przesyłu danych. Wybór interfejsu zależy od aplikacji w której ma pracować. Interfejs UART może pracować z profilem obsługi portu szeregowego, interfejs SPI może służyć do programowania pamięci *flash* modułu (aktualizacja oprogramowania). Interfejsem PCM można przesyłać sygnał dźwiękowy z dołączonym do niego kodekiem (np słuchawki bezprzewodowe). W robocie wykorzystano jedynie interfejs UART. Posiada on cztery linie UART-CTS, UART-RTS, UART-TX, URAT-RX. Dwie pierwsze służą do sprzętowej kontroli przepływu danych. W przypadku komunikacji bez kontroli przepływu należy te linie pozostawić niepodłączone lub połączyć ze sobą. Kolejne dwie linie służą do przesyłania danych. Moduł z wykorzystaniem interfejsu UART może pracować w dwóch trybach: trybie komend lub trybie przesyłania danych. Pierwszy jest aktywny gdy nie występuje zdalne połączenie z modułem. Istnieje wtedy możliwość konfiguracji modułu wysyłając komendy w postaci ciągu znaków ASCII (komendy AT).



Rysunek 3.24 Moduł Bluetooth BTM-112, opis wyprowadzeń [19]

Nr wyp.	Nazwa	Opis
6	RESET	reset układu stanem wysokim
7	SPI-MISO	wyjście danych magistrali SPI
8	SPI-CSB	wejście wyboru układu na magistrali SPI
9	SPI-CLK	wejście zegara magistrali SPI
10	SPI-MOSI	wejście danych magistrali SPI
11	UART-CTS	interfejs UART, gotowość do wysyłania
12	UART-TX	interfejs UART, dane wysyłane
13	UART-RTS	interfejs UART, żądanie nadawania
14	UART-RX	interfejs UART, dane odbierane
16	3V3	zasilanie modułu +3.3V
17,32,34	GND	masa modułu
18	PCM-OUT	interfejs PCM, wyjście danych
19	PCM-SYNC	interfejs PCM, linia synchronizacji
20	PCM-IN	interfejs PCM, wejście danych
21	PCM-CLK	interfejs PCM, linia zegara
22	USB-DP	interfejs USB, linia D+
23	USB-DN	interfejs USB, linia D-
25	PIO(6)	status połączenia (wyjście np na diodę świecącą)
33	RF-IO	zewnętrzna antena (50Ω)
pozostałe	PIO(0..10)	programowalne wejścia/wyjścia

Tabela. 3.14 Opis wyprowadzenia modułu Bluetooth BTM-112

Drugi tryb jest aktywny gdy dowolne urządzenie jest połączone z modułem. Wtedy nie ma możliwości konfiguracji. Przykładowe komendy konfiguracji modułu BTM-112 przedstawiono w tabeli 3.15. Pełny spis komend oraz opis modułu znajduje się w [19].

Do komunikacji z robotem można użyć dowolnego terminala obsługującego transmisję szeregową lub oprogramowanie dołączone na płycie CD pod nazwą "RS_Comm.exe¹" lub "Terminal.exe²". Zestaw komend obsługiwanych przez robota przedstawiono w tabeli E.1. Sposób łączenia robota z komputerem oraz zdalnego sterowania opisano w dodatku F.

¹Koło Naukowe Robotyków "KoNaR", autor: Jan Kędzierski

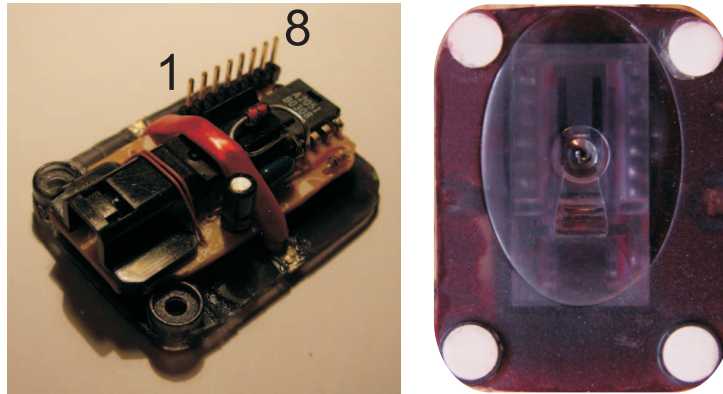
²Darmowy program pobrany z: <http://braypp.googlepages.com/terminal>, autor: braypp@gmail.com

Komenda	Opis
I	wersja oprogramowania modułu I? - zwraca wersję oprogramowania
K	wybór ilości bitów stopu portu szeregowego K0 - 1 bit stopu K1 - 2 bity stopu K? - zwraca aktualne ustawienie
L	wybór prędkości transmisji portu szeregowego L1 - 9600b/s L2 - 19200b/s L4 - 57600b/s L5 - 115200b/s L? - zwraca aktualne ustawienie
N	zmiana nazwy urządzenia widzianej z zewnątrz N=xxxxx - "xxxxx" to nazwa (max. dł. 16 znaków) N? - zwraca aktualną nazwę
P	zmiana numeru PIN modułu P=xxxx - "xxxx" to numer PIN (4 - 8 znaków) P0 - wyłączenie żądania numeru PIN P? - zwraca aktualny numer PIN
R	wybór trybu R0 - praca w trybie "master" R1 - praca w trybie "slave" R? - zwraca aktualne ustawienie
Z	przywracanie ustawień fabrycznych Z0 - ustawienia fabryczne (19200b/s, slave) Z? - zwraca aktualne ustawienia

Tabela. 3.15 Ważniejsze komendy konfiguracyjne modułu BTM-112

3.8 Optyczny czujnik przemieszczenia

Robot posiada optyczny czujnik przemieszczenia używany w myszkach komputerowych. Umożliwia on pomiar przemieszczenia w globalnym układzie odniesienia. Zasada działania tego rodzaju czujników jest oparta na Technologii Nawigacji Optycznej (*Optical Navigation Technology*). Wewnątrz układu znajduje się miniaturowa monochromatyczna kamera cyfrowa, która pobiera obraz nawierzchni pod czujnikiem, oświetlonej przez dodatkowe źródło światła w postaci diody LED. Na podstawie zmieniającego się obrazu, układ oblicza zmianę położenia w dwóch prostopadłych kierunkach X, Y [4]. Do konfiguracji układu służy synchroniczna magistrala szeregową. Zaletą układu są wyjścia kwadraturowe, dzięki którym układ można traktować jak zwykły koder kwadraturowy. Dokładny opis czujnika oraz jego obsługi wraz z fragmentami kodu dla mikrokontrolera MC68332 znajduje się w [4]. Rysunek 3.25 przedstawia wygląd czujnika, a w tabeli 3.16 opisano znaczenie wyprowadzeń czujnika.



Rysunek 3.25 Optyczny czujnik przemieszczenia [4]

Nr wyp.	Nazwa	Opis
1	VCC	zasilanie układu +5V
2	GND	masa układu
3	XA	wyjście kwadraturowe X-A
4	XB	wyjście kwadraturowe X-B
5	YA	wyjście kwadraturowe Y-A
6	YB	wyjście kwadraturowe Y-B
7	SCLK	sygnał zegarowy magistrali szeregowej
8	SDIO	linia danych magistrali szeregowej

Tabela. 3.16 Opis złącza optycznego czujnika przemieszczenia

Rozdział 4

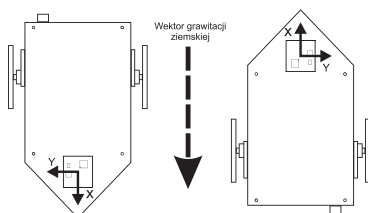
Badania

Wszystkie badania przeprowadzono przy użyciu opisanej we wcześniejszym rozdziale platformy mobilnej BlueScreen V2. Pomiary z czujników zbierano poprzez bezprzewodową komunikację *Bluetooth* korzystając z usługi portu szeregowego (RS232). Do sterowania platformą oraz przechwytywania ciągu pomiarów z czujników posłużono się programem *Terminal.exe*, który został dołączony do pracy. Do sporządzania wykresów ze zgromadzonych pomiarów wykorzystano środowisko Matlab. Napisano również w tym środowisku specjalne skrypty odpowiedzialne za formatowanie wykresów, skalowanie jednostek oraz kalibrację zera (*off-line*). Dokładny opis przygotowania stanowiska znajduje się w dodatku F, a opis wyświetlania wyników w środowisku Matlab w dodatku G.

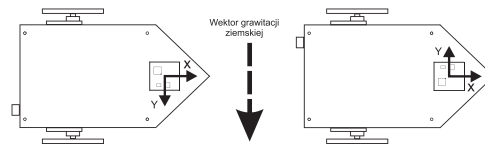
4.1 Wyznaczanie zera i skalowanie akcelerometru analogowego MMA6270

Chcąc przekazać sygnał z czujnika analogowego do mikrokontrolera musimy użyć przetwornika A/C. Przetwornik przetwarza sygnały napięciowe z odpowiedniego zakresu na wartości cyfrowe. Wartości te nie są wyskalowane w żadnych jednostkach - zależą jedynie od rozdzielczości przetwornika i poziomu napięcia odniesienia.

W przypadku akcelerometru analogowego MMA6270, który mierzy przyspieszenia z zakresu $-2g$ do $+2g$, sygnały wyjściowe odpowiadające tym wartościom przyspieszeń (zgodnie z notą katalogową [12]) są w granicach od $0.85V$ do $2.45V$. Tak więc brak przyspieszenia w danej osi jest reprezentowany jako sygnał napięciowy w połowie tego zakresu. Idąc tą drogą możnaby, uwzględniając napięcie referencyjne przetwornika A/C, obliczyć jaką wartość przetwornika odpowiada zerowemu przyspieszeniu. Jednak obliczona w ten sposób wartość nie jest dokładna z tego względu, że noty katalogowe podają wartości typowe, a każdy wyprodukowany czujnik nieco różni się od innych.



Rysunek 4.1 Wyznaczanie zera akcelerometru MMA6270 w osi X



Rysunek 4.2 Wyznaczanie zera akcelerometru MMA6270 w osi Y

W prosty sposób można wyznaczyć zero eksperymentalnie, wykorzystując znane przyspieszenie grawitacji ziemskiej które wynosi $1g$ oraz fakt, że zwrot wektora przyspieszenia grawitacji jest skierowany pionowo (w kierunku do środka Ziemi). Aby tego dokonać należy ustawić robota tak aby wektor przyspieszenia badanej osi akcelerometru możliwie dokładnie pokrywał się z wektorem przyspieszenia ziemskiego np. przy pomocy poziomicy. Następnie należy, zbierając pomiary z czujnika, powoli, delikatnie odchyłać robota w różnych kierunkach tak aby badana oś akcelerometru odchyłała się od pionu. Z puli zebranych w ten sposób pomiarów należy wyodrębnić maksymalną wartość przetwornika. Jest to reprezentacja przyspieszenia o wartości $1g$. Podobną serię pomiarów należy zebrać dla ustawienia robota tak, aby wektor przyspieszenia akcelerometru miał przeciwny zwrot, wtedy minimalna wartość jest reprezentacją przyspieszenia $-1g$, a reprezentacją zera jest wartość w położeniu pomiędzy reprezentacją minimum i maksimum. Wartości te można wykorzystać również do wyskalowania czujnika. Na rysunkach 4.1 oraz 4.2 przedstawiono ustawienia robota podczas wyznaczania zera dla osi X oraz Y.

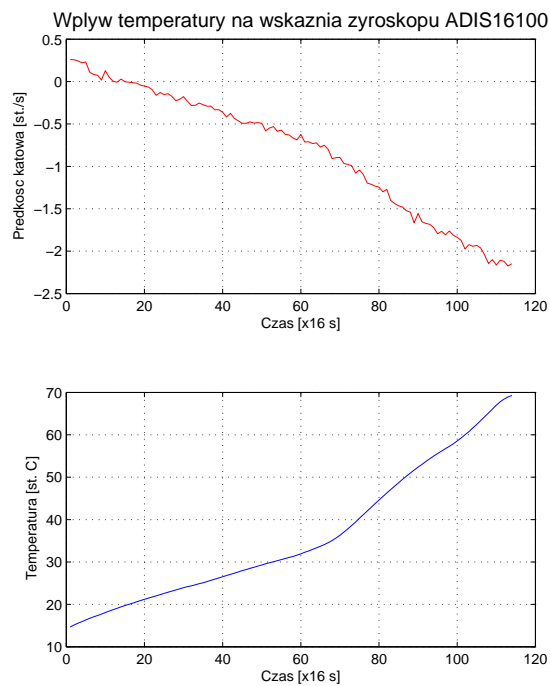
4.2 Kompensacja temperaturowa akcelerometru MMA6270 i żyroskopu ADIS16100

Czujniki inercyjne takie jak żyroskopy czy akcelerometry są wrażliwe na zmiany temperatury otoczenia. Aby uniknąć błędów wskazań związanych ze zmianami temperatury stosuje się kompensację temperaturową. Polega ona na korygowaniu wartości odczytywanych z czujników odpowiednimi wartościami zależącymi od panującej temperatury. Należy zatem mierzyć, oprócz właściwej wielkości wyjściowej danego czujnika, również temperaturę. Producenci czujników inercyjnych często dają możliwość kompensacji temperaturowej poprzez wbudowanie wewnątrz dodatkowego czujnika temperatury. Można również wykorzystać zewnętrzny czujnik temperatury jednak w takim wypadku istnieje ryzyko pojawienia się dodatkowych błędów wynikających z różnych szybkości zmian temperatur czujnika inercyjnego oraz czujnika temperatury gdyż są one w innych obudowach. Spotyka się również czujniki skompensowane fabrycznie [13].

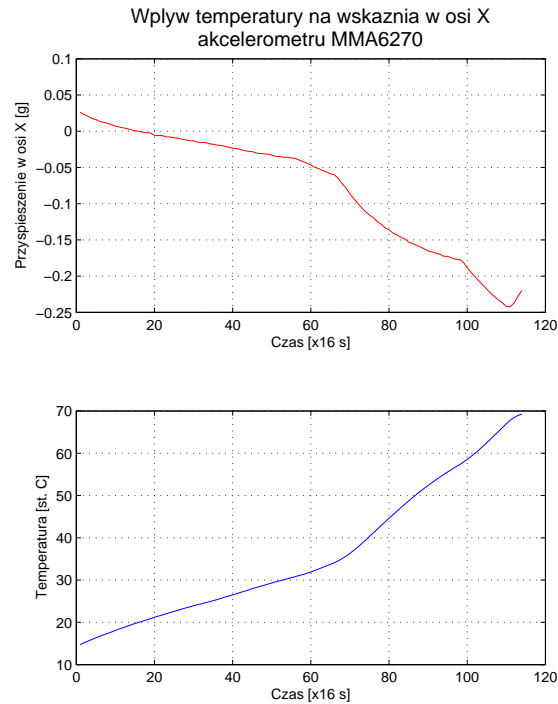
Istnieją dwa sposoby na dokonanie kompensacji temperaturowej. Pierwszy z nich polega na wyznaczeniu funkcji zmian wskazań czujników pod wpływem zmian temperatury oraz wyliczaniu wartości korygującej wprost z tej funkcji. Drugi sposób polega na przyporządkowaniu (wyznaczeniu tablicy) wartości korygujących dla każdej wartości temperatury w użytecznym zakresie. Ponieważ charakterystyki wskazań czujników inercyjnych w funkcji temperatury często nie są liniowe, wyznaczenie funkcji z pierwszego sposobu nie zawsze jest łatwe. Wadą drugiego sposobu jest zużywanie dużej ilości pamięci mikrokontrolera. Ze względu na użyty w robocie mikrokontroler, który dysponuje dużym obszarem pamięci zdecydowano na wykorzystanie drugiego sposobu kompensacji.

4.2.1 Przebieg eksperymentu

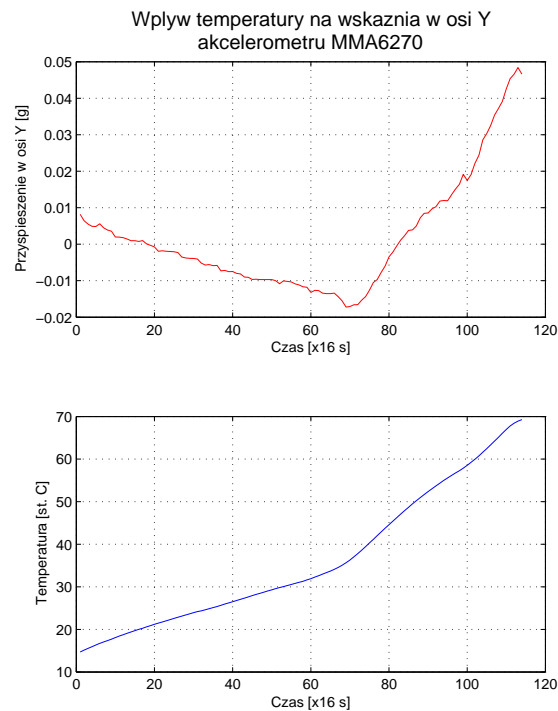
Aby zmienić temperaturę otoczenia robota, umieszczono go w domowej chłodziarce. Po pewnym czasie (gdy robot osiągnął temperaturę panującą wewnątrz chłodziarki) wyjęto go, ustawiono nieruchomo i zaczęto mierzyć wskazania czujników. Po osiągnięciu przez robota temperatury pokojowej, zaczęto podgrzewać go suszarką do włosów. Pomiary z czujników inercyjnych przesyłano co 16 ms, a eksperyment trwał około 30 minut. Na rysunku 4.3 przedstawiono wpływ zmiany temperatury na wskazania żyroskopu ADIS16100 w przypadku gdy robot się nie porusza. Dla lepszego zobrazowania wyników, pomiary zostały uśrednione (wyliczono średnią wartość z każdego tysiąca próbek). Na kolejnych rysunkach 4.4, 4.5 przedstawiono te same zależności dla osi X oraz Y akcelerometru MMA6270.



Rysunek 4.3 Wpływ temperatury na wskazania żyroskopu ADIS16100



Rysunek 4.4 Wpływ temperatury na wskazania osi X akcelerometru MMA6270

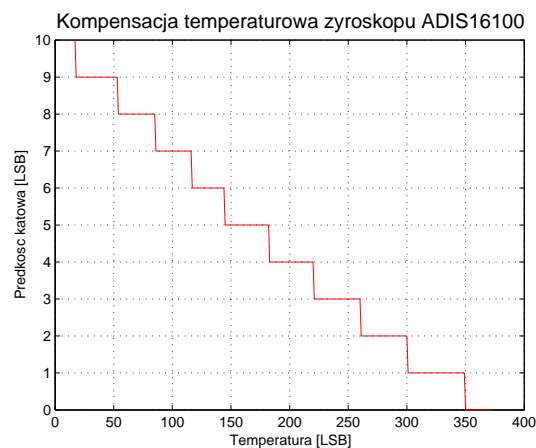


Rysunek 4.5 Wpływ temperatury na wskazania osi Y akcelerometru MMA6270

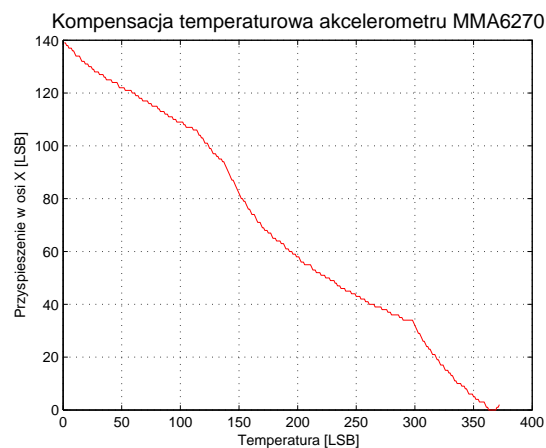
4.2.2 Wyznaczanie tablicy wartości korygujących

Tablica wartości korygujących ma rozmiar odpowiadający zakresowi temperatur w którym ma występować kompensacja. Jako indeks tablicy podaje się wprost wartość temperatury i odczytuje wartość jaką należy odjąć od wskazań czujnika aby uzyskać pomiar niezależny od temperatury. Do tych operacji używa się wielkości odczytanych bezpośrednio z przetwornika A/C bez przeskalowywania na odpowiednie jednostki.

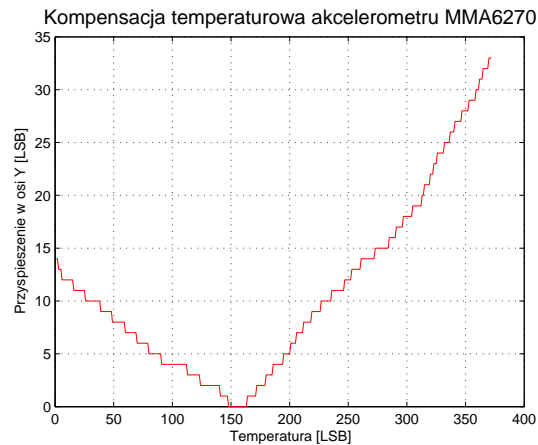
Tablicę wyznaczono w następujący sposób. Ze wszystkich zgromadzonych pomiarów dla danego czujnika inercyjnego wyodrębniono jednakowe wartości temperatur, następnie uśredniono odpowiadające im wskazania danego czujnika. Na końcu posortowano wskazania czujników tak aby odpowiadające im wartości temperatur tworzyły rosnący ciąg. W tym przypadku pomiary były robione na tyle często, że w serii wystąpiła każda wartość temperatury. W przypadku gdyby tak się nie stało należałoby uzupełnić brakujące pomiary poprzez interpolację. Charakterystyka wykreślona na podstawie wyznaczonej tablicy powinna być gładka (z dokładnością do rozdzielczości przetwornika A/C wyrażonej w jednostkach najmniej znaczącego bitu - LSB). Aby tak było, zazwyczaj należy dodatkowo przeprowadzić aproksymację. Taka potrzeba zaistniała również w przypadku opisywanego eksperymentu.



Rysunek 4.6 Wpływ temperatury na wskazania żyroskopu ADIS16100



Rysunek 4.7 Wpływ temperatury na wskazania akcelerometru MMA6270 w osi X



Rysunek 4.8 Wpływ temperatury na wskazania akcelerometru MMA6270 w osi Y

4.2.3 Wnioski

Podczas przeprowadzania eksperymentu kompensacji temperaturowej zauważono, że temperatura mocno wpływa na wskazania akcelerometru, co ciekawe nie wpływa tak samo (a nawet niepodobnie) na poszczególne osie. Charakterystyka wpływu temperatury na oś X jest zbliżona od liniowej. W przypadku tej osi występują największe różnice wskazań w całym zakresie temperatur. Wskazania dla osi Y charakteryzują się mniejszym wahaniami, ale charakterystyka jest nieliniowa.

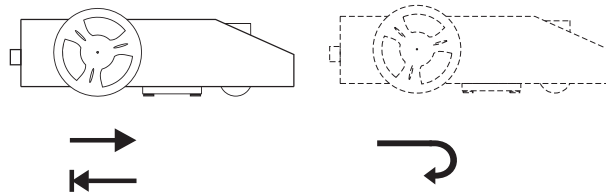
Wpływ temperatury na wskazania żyroskopu jest najmniejszy spośród badanych czujników, a charakterystyka najbardziej przypomina liniową. Z powodu bardzo małych zmian wartości w funkcji temperatury możemy zauważyć "schodkowość" charakterystyki.

Czujnik temperatury który został wykorzystany do kompensacji obu czujników jest umieszczony wewnątrz żyroskopu. O ile zapewnia to poprawne warunki dla kompensacji żyroskopu, o tyle jest niekorzystne w przypadku akcelerometru. Obudowy obu czujników mają inne własności (wielkość obudowy, rodzaj materiału którym jest wypełniony czujnik) co powoduje że czujniki te nie zmieniają temperatury z jednakową szybkością. To może być powodem błędów kompensacji. Aby tego uniknąć należałoby wymusić bardzo powolną zmianę temperatury podczas eksperymentu kompensacji, aby na pewno temperatury obu czujników były równe przy pobieraniu próbki. Nie rozwiązuje to jednak problemu do końca, ponieważ już skompensowany w ten sposób czujnik jest zawsze narażony na krótkie, szybkie wahania temperatury spowodowane np. podmuchem wiatru, które powodują błędne pomiary do momentu zrównania temperatur obu czujników. Z tego względu, jeśli zachodzi potrzeba kompensacji temperaturowej, przy doborze czujników powinno się zwracać uwagę na to, czy dany czujnik ma możliwość pomiaru temperatury.

4.3 Wyznaczanie prędkości liniowej oraz przebytej drogi platformy mobilnej przy pomocy akcelerometru

Badania przeprowadzono dla ruchu platformy po linii prostej w przód, a następnie w tył bez zatrzymania przy zmianie kierunku, tak jak pokazano to na rysunku 4.9. Wykreślono charakterystyki dla sterowania platformą w sposób skokowy oraz trapezowy. Sterowanie skokowe polega na skokowej zmianie prędkości (od bieżącej do zadanej). Nachylenie charakterystyki sterowania w czasie jest wtedy strome. Przy sterowaniu trapezowym

następuje powolny wzrost (lub spadek) prędkości do wartości zadanej, a charakterystyka sterowania w czasie jest mniej stroma. Przeprowadzono eksperymenty dla dwóch akcelerometrów: MMA6270 i MMA7455L. Mierzono przyspieszenia w osi X za pomocą akcelerometrów oraz prędkości i przebyte drogi platformy za pomocą koderów kwadraturowych umieszczonych na kołach robota.



Rysunek 4.9 Ruch robota po okręgu

W badaniach użyto różnych rodzajów filtrów:

- Filtr mechaniczny

Płyta główna robota oddzielona od modułu nawigacyjnego materiałem przypominającym gąbkę.

- Filtr analogowy

Sprzętowy (analogowy), antyaliasingowy filtr dolnoprzepustowy o charakterystyce eliptycznej (tylko akcelerometr MMA6270) z możliwością zmiany częstotliwości odcięcia w zakresie $1.83Hz$ do $1kHz$.

- Filtry cyfrowe

- Filtr uśredniający

Uśrednianie dziesięciu kolejnych próbek z odrzuceniem spośród nich największej i najmniejszej wartości. Pobieranie próbek z akcelerometru odbywa się z częstotliwością $500Hz$ natomiast uśrednione pomiary wysyłane są do komputera z częstotliwością $62Hz$.

- Filtr opóźniający

Wartość aktualnej próbki jest wyliczana jako "średnia krocząca" (*moving average*) aktualnej próbki z poprzednimi zgodnie ze wzorem 4.1. Przyjęto wagę poprzednich próbek $\frac{7}{8}$ oraz wagę bieżącej próbki $\frac{1}{8}$. Pobieranie próbek z akcelerometru i przeliczenia filtru opóźniającego odbywają się z częstotliwością $500Hz$, a wysyłanie pomiarów do komputera odbywa się z częstotliwością $62Hz$.

$$y_n = \alpha \cdot x_n + (1 - \alpha)y_{n-1} \quad (4.1)$$

gdzie $0 < \alpha < 1$, y_n -wartość wyjściowa w kroku n , x_n - pomiar w kroku n , y_{n-1} -poprzednia wartość wyjściowa.

- Brak filtracji cyfrowej

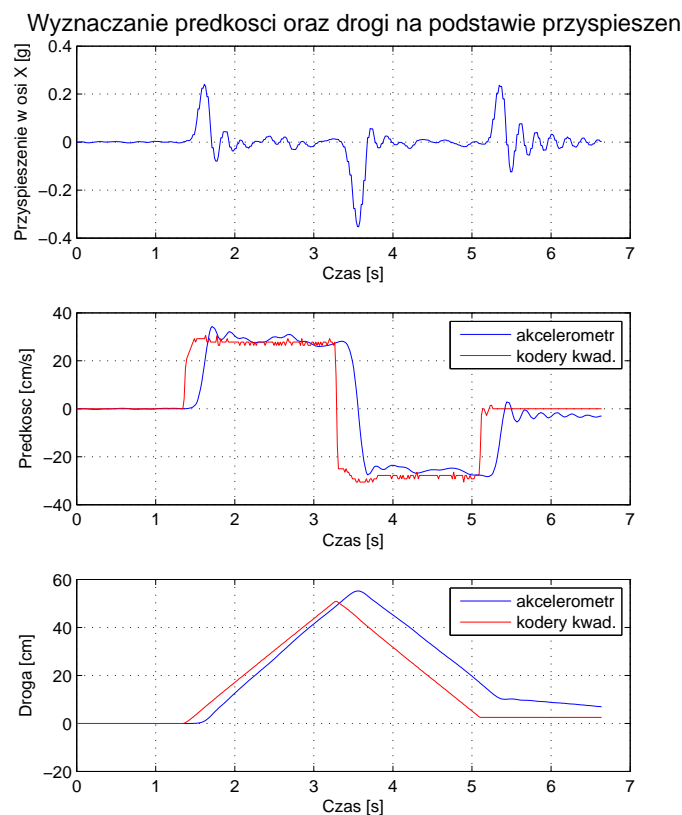
Pomiary odczytywane z częstotliwością $62Hz$ bezpośrednio z akcelerometru.

Na podstawie odczytanych wartości przyspieszeń podjęto również próby wyznaczenia prędkości oraz drogi przebytej przez platformę poprzez całkowanie oraz porównano wyniki z wartościami zmierzonymi przez kodery kwadraturowe umieszczone na osi kół robota. Całkowania dokonano *off-line* w środowisku Matlab [10].

4.3.1 Wpływ filtru mechanicznego na akcelerometr MMA6270

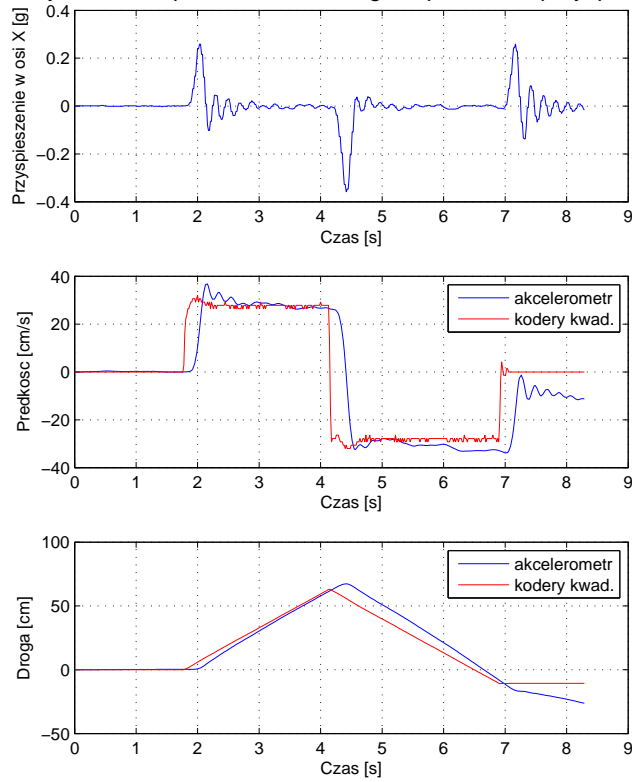
Wpływ filtru mechanicznego na pomiary przyspieszeń akcelerometrem MMA6270 zbadano dla dwóch różnych częstotliwości odcięcia filtru analogowego. Filtr cyfrowy dla wszystkich pomiarów ustawiono na uśredniający, a platformą sterowano w sposób skokowy. Rysunek 4.10 przedstawia wyniki dla sztywnego umocowania modułu nawigacyjnego (brak filtru mechanicznego) przy częstotliwości odcięcia filtru analogowego ustawionej na 10Hz. Wyniki dla tych samych parametrów z filtrem mechanicznym przedstawiono na rysunku 4.11. Z porównania wyznaczonych, poprzez całkowanie, prędkości oraz drogi z wartościami odczytanymi z kodery kwadraturowych wynika że błędy w obu przypadkach utrzymują się na podobnym poziomie. Różnice mogą wynikać z błędów powtarzalności eksperymentów.

Inaczej sytuacja przedstawia się przy ustawieniu częstotliwości odcięcia filtru analogowego na 100Hz. Rysunek 4.12 przedstawia wyniki eksperymentu bez użycia filtru mechanicznego natomiast rysunek 4.13 obrazuje eksperyment z wykorzystaniem tego filtru. Można zauważyć że charakterystyka przyspieszeń jest bardziej gładka dla pomiarów bez filtru mechanicznego. Jest to zapewne spowodowane tym, że pomimo tłumienia przez filtr pewnych wysokich częstotliwości, wprowadzane są również zakłócenia o niewielkiej amplitudzie i częstotliwości (zależnej od użytego w filtrze materiału) spowodowane drganiami własnymi układu z gąbką. Zjawisko to nie zachodzi w przypadku ustawienia częstotliwości odcięcia filtru analogowego na 5Hz gdyż zakłócenia wprowadzane przez filtr mechaniczny mogą mieć wyższe częstotliwości niż 5Hz i być tłumione przez filtr analogowy. Wprowadzone przez filtr mechaniczny zakłócenia mają niekorzystny wpływ na wyznaczanie prędkości i drogi poprzez całkowanie. Z rysunków 4.12, 4.13 wynika że mniejsze błędy występują w przypadku braku filtru mechanicznego.



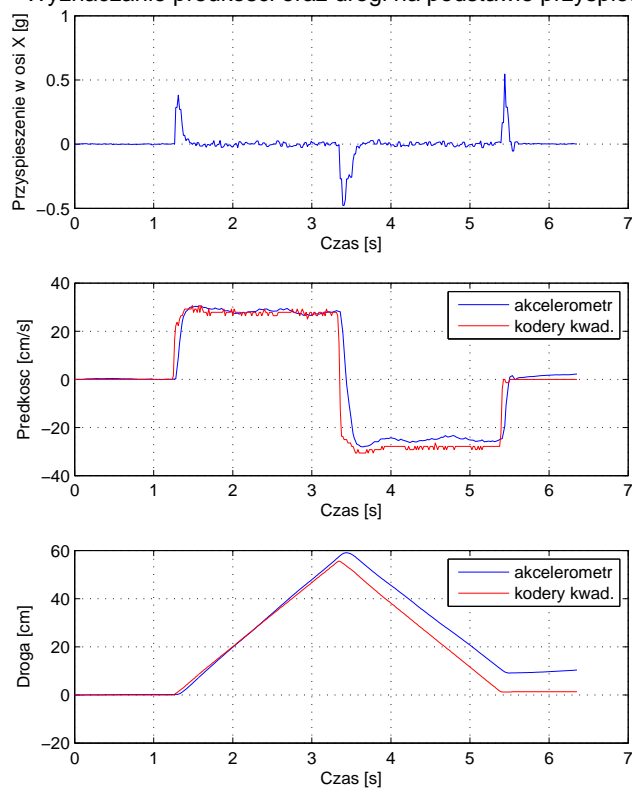
Rysunek 4.10 Ruch robota bez filtru mechanicznego (filtr analogowy 5Hz)

Wyznaczanie predkosci oraz drogi na podstawie przyspieszen

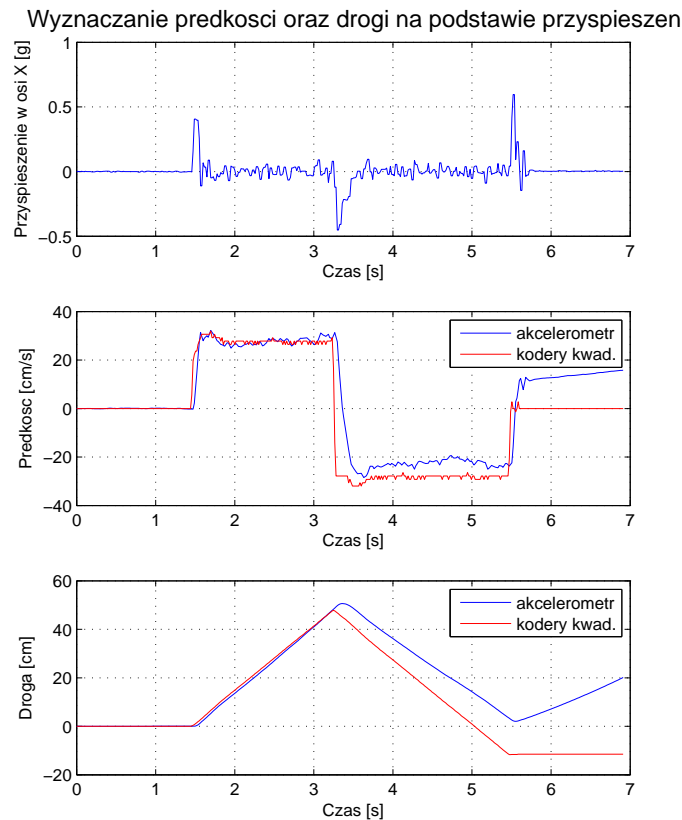


Rysunek 4.11 Ruch robota z filtrem mechanicznym (filtr analogowy 5Hz)

Wyznaczanie predkosci oraz drogi na podstawie przyspieszen



Rysunek 4.12 Ruch robota bez filtru mechanicznego (filtr analogowy 100Hz)



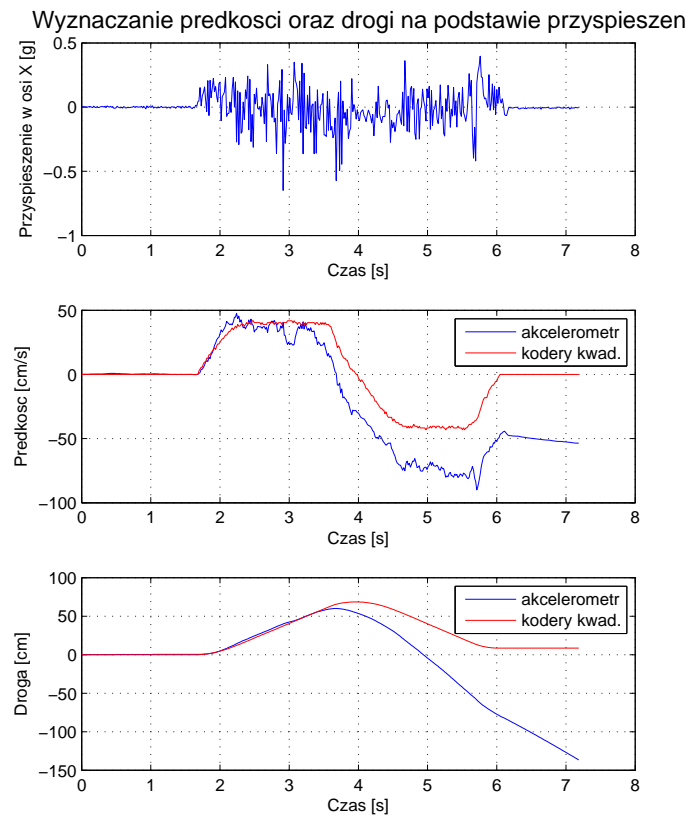
Rysunek 4.13 Ruch robota z filtrem mechanicznym (filtr analogowy 100Hz)

4.3.2 Wpływ filtru analogowego na akcelerometr MMA6270

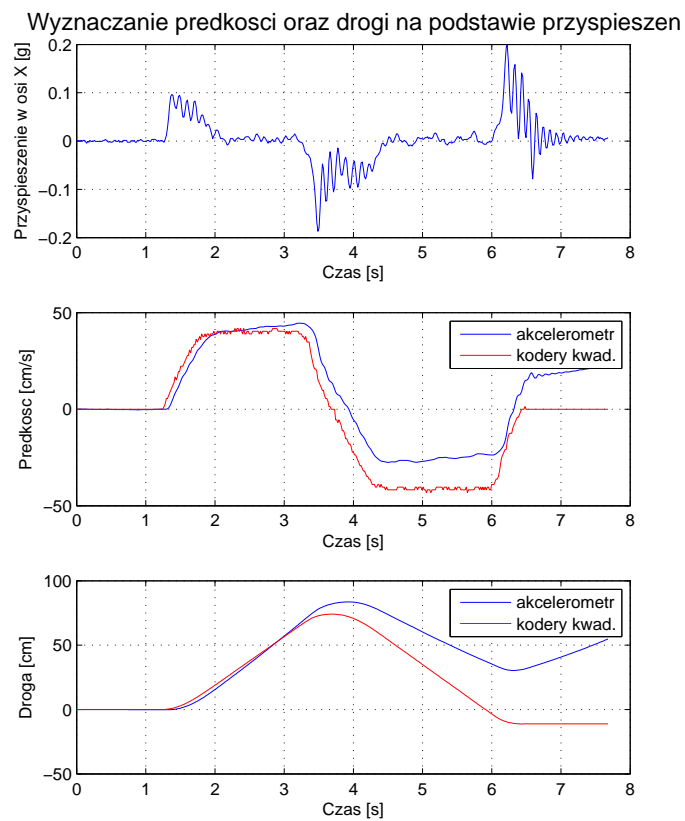
Wpływ filtru analogowego na pomiary przyspieszeń akcelerometrem MMA6270 zbadano z użyciem filtru mechanicznego, bez filtracji cyfrowej przy sterowaniu platformy trapezowo. Wykreślono charakterystyki dla trzech różnych wartości częstotliwości odcięcia filtru analogowego. Rysunki 4.14, 4.15, 4.16 przedstawiają działanie filtru analogowego dla częstotliwości odcięcia kolejno 100Hz, 10Hz i 5Hz.

Z wykreślonych charakterystyk widać że użycie filtru analogowego ma duży wpływ na poprawę jakości pomiarów. Wraz ze wzrostem częstotliwości odcięcia, charakterystyki przyspieszeń są bardziej gładkie. Przekłada się to również na zmniejszanie się błędów wyznaczania prędkości oraz drogi poprzez całkowanie. Zmniejszanie częstotliwości odcięcia wpływa również na przesunięcie charakterystyk w fazie. Im niższa częstotliwość tym większe opóźnienie pomiarów. Wynika to z własności fazowych filtru analogowego. Z uwagi na to że jest to 8-biegunowy filtr eliptyczny przesunięcie fazowe jest zjawiskiem nieuniknionym.

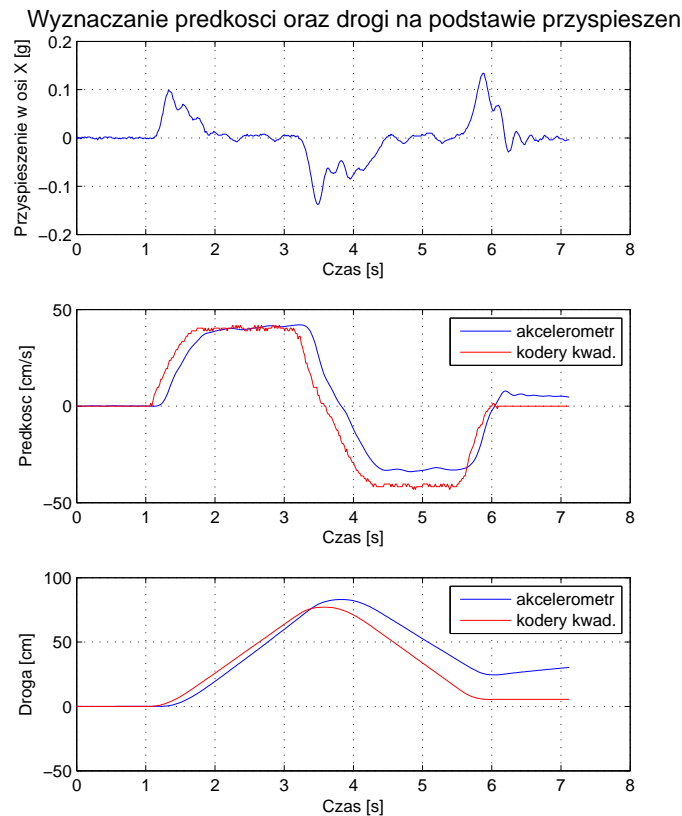
Najlepsze wyniki uzyskano dla częstotliwości odcięcia 5Hz (rysunek 4.16), gdzie otrzymane z całkowania charakterystyki niemal pokrywają się z charakterystykami pochodzącymi z koderów kwadraturowych. W przypadku częstotliwości odcięcia filtru 10Hz (rysunek 4.15) na charakterystyce przyspieszeń widać wyraźne oscylacje przy zmianach ruchu. Mogą to być wspomniane już wcześniej zakłócenia pochodzące od filtru mechanicznego.



Rysunek 4.14 Działanie filtru analogowego dla częstotliwości odcięcia 100Hz



Rysunek 4.15 Działanie filtru analogowego dla częstotliwości odcięcia 10Hz

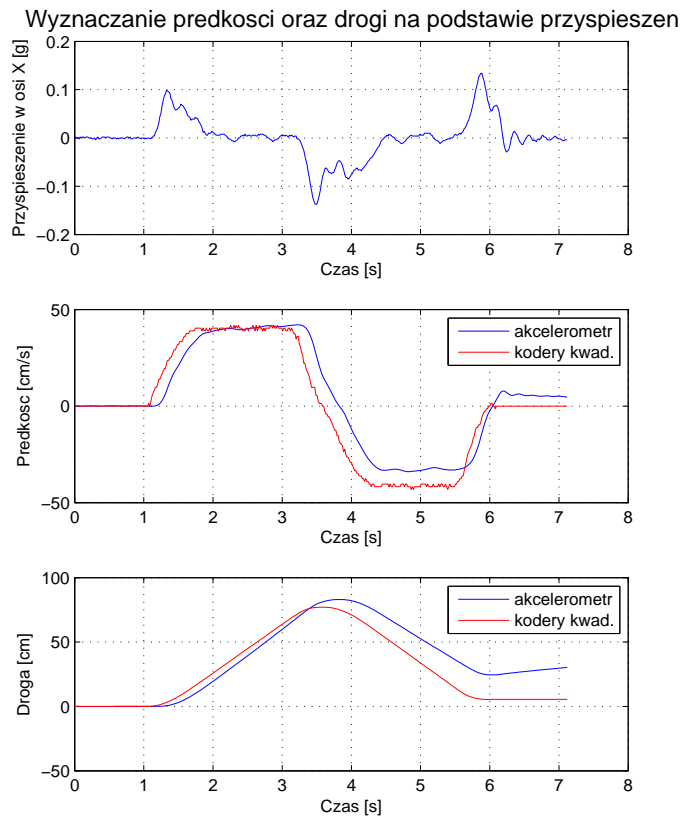


Rysunek 4.16 Działanie filtra analogowego dla częstotliwości odcięcia 5Hz

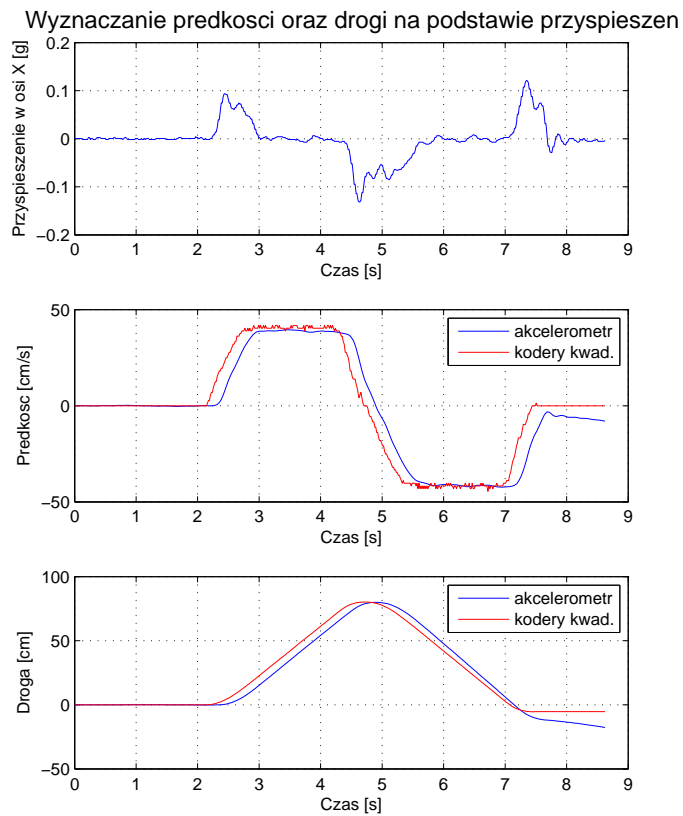
4.3.3 Wpływ filtra cyfrowego na akcelerometr MMA6270

Wpływ filtracji cyfrowej przebadano z użyciem filtra mechanicznego, dla stałej wartości filtra analogowego wynoszącej 5Hz, przy sterowaniu platformy trapezowo. Użyto dwóch filtrów cyfrowych: opóźniającego i uśredniającego. Dokonano również pomiarów bez użycia filtracji cyfrowej.

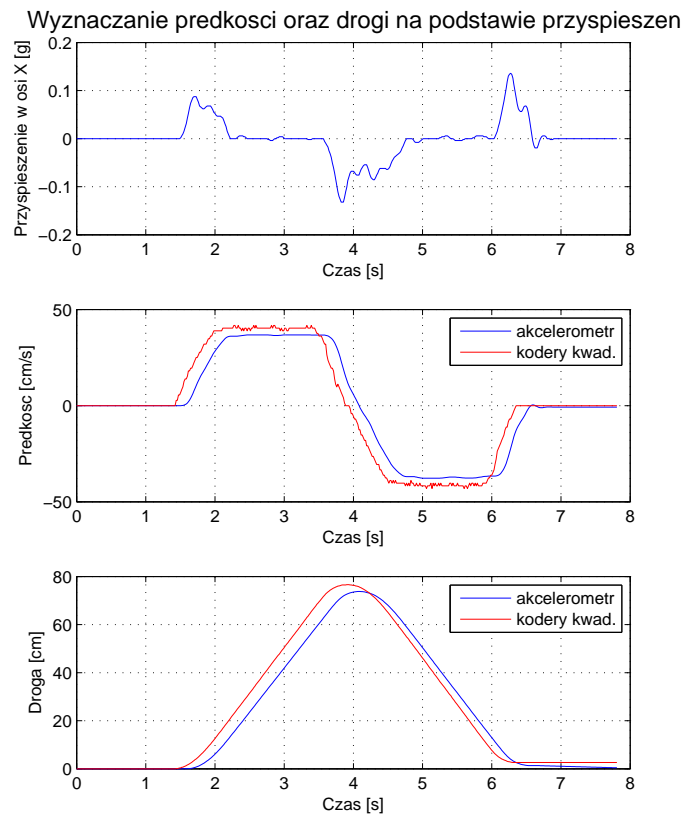
Rysunek 4.17, przedstawia wyniki dla braku filtra cyfrowego, a rysunki 4.18, 4.19 dla filtrów uśredniającego i opóźniającego. We wszystkich trzech przypadkach charakterystyki przyspieszeń są dosyć gładkie ze względu na zastosowany filtr analogowy (5Hz). Dzięki temu, obserwując scałkowane charakterystyki można lepiej określić wpływ filtrów cyfrowych. Z badań wynika że filtry te wpływają na zmniejszenie błędów wyznaczanych prędkości i drogi, gdyż największe błędy występują przy braku filtracji cyfrowej (rysunek 4.17). Filtr uśredniający (rysunek 4.18) daje lepsze wyniki. Wyznaczone charakterystyki prędkości oraz drogi pokrywają się przez znaczną część ruchu, ale na końcu prędkość nie powraca do zera i co za tym idzie droga różni się od drogi zmierzonej przez kodery kwadraturowe. Najlepsze wyniki wydaje się dawać wykorzystanie filtra opóźniającego (rysunek 4.19). W tym przypadku prędkość uzyskana z całkowania na końcu ruchu powraca idealnie do zera. Również droga w końcu ruchu jest taka sama jak pochodząca z koderów kwadraturowych. Należy jednak zauważyć że filtr opóźniający wprowadza pewne dodatkowe błędy. Charakterystyka prędkości pochodząca z całkowania nie osiąga wartości prędkości zmierzonych przez kodery kwadraturowe. Prędkości są nieco mniejsze (przytłumione). Objawia się to również w przypadku drogi - jest nieco mniejsza niż zmierzona przez kodery.



Rysunek 4.17 Ruch robota bez filtracji cyfrowej



Rysunek 4.18 Działanie filtru uśredniającego



Rysunek 4.19 Działanie filtru opóźniającego

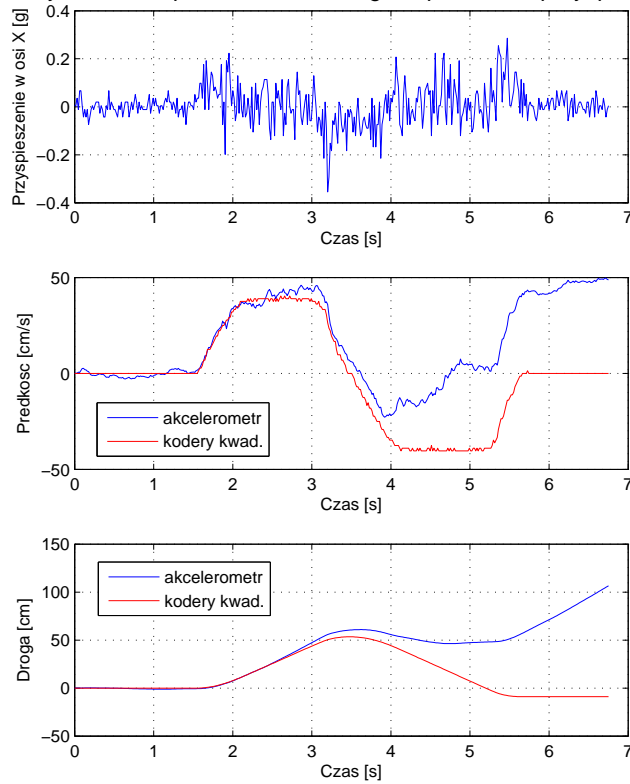
4.3.4 Wpływ filtru cyfrowego na akcelerometr MMA7455L

Wpływ filtrów cyfrowych na pomiary z akcelerometru MMA7455L przebadano z użyciem filtru mechanicznego przy sterowaniu trapezowym platformy. Podobnie jak w przypadku drugiego akcelerometru przeprowadzono badania dla filtru uśredniającego i opóźniającego oraz dokonano pomiarów bez filtracji cyfrowej.

Rysunek 4.20 przedstawia wyniki pomiarów bez filtru cyfrowego, natomiast rysunki 4.21, 4.22 obrazują wyniki dla filtrów: opóźniającego i uśredniającego. Przebadane filtry cyfrowe wpływają na zmniejszenie błędów wyznaczania prędkości oraz drogi w niewielkim stopniu. W żadnym przypadku nie otrzymano zerowej prędkości na końcu ruchu. Z badań wynika, że najmniejsze błędy występują dla filtru uśredniającego ale nie są to zadowalające wyniki.

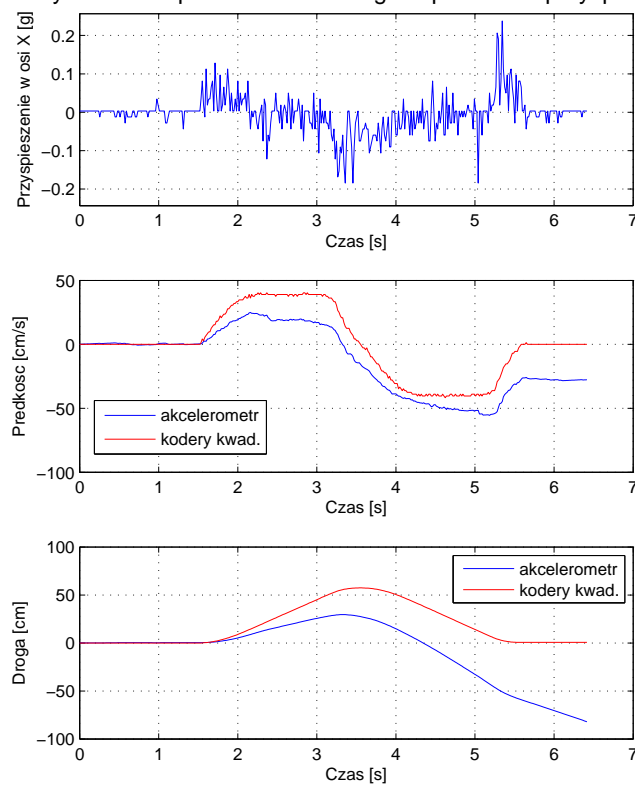
Przeprowadzone badania nasuwają wniosek, że użycie samych filtrów cyfrowych nie wystarcza podczas wyznaczania prędkości i drogi robota. Filtry te mogą służyć jedynie do wygładzania już odfiltrowanych sygnałów (np. filtrem analogowym). Wynika to z faktu, że filtracja antyaliasingowa (przed próbkowaniem) jest niewystarczająca (filtr 1-biegunowy).

Wyznaczanie predkosci oraz drogi na podstawie przyspieszen

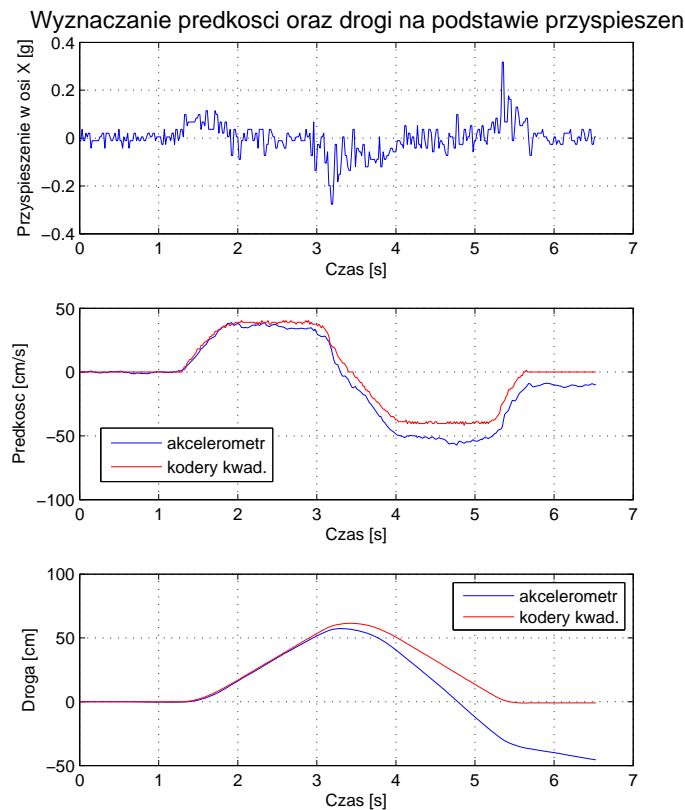


Rysunek 4.20 Ruch robota bez filtracji cyfrowej

Wyznaczanie predkosci oraz drogi na podstawie przyspieszen



Rysunek 4.21 Działanie filtru opóźniającego

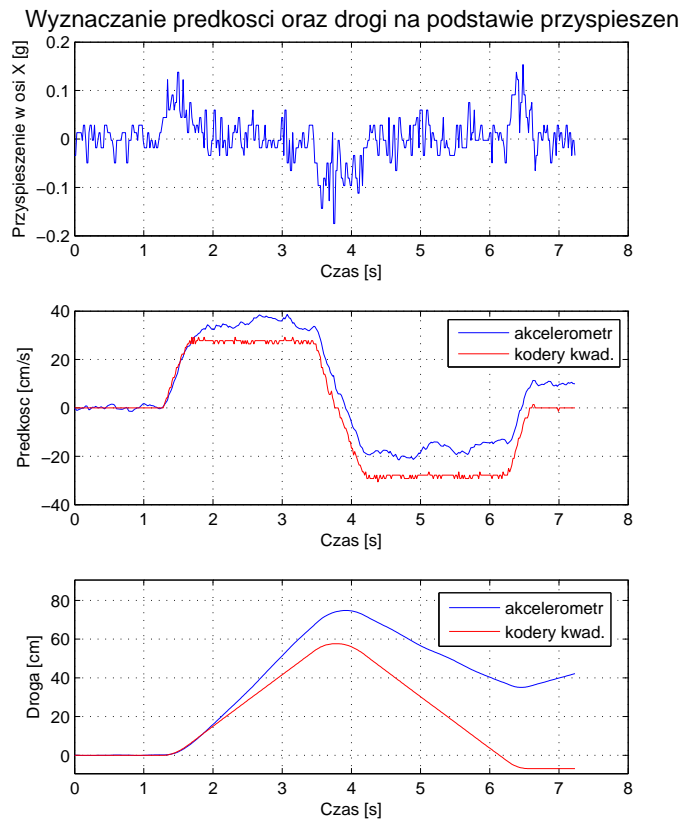


Rysunek 4.22 Działanie filtru uśredniającego

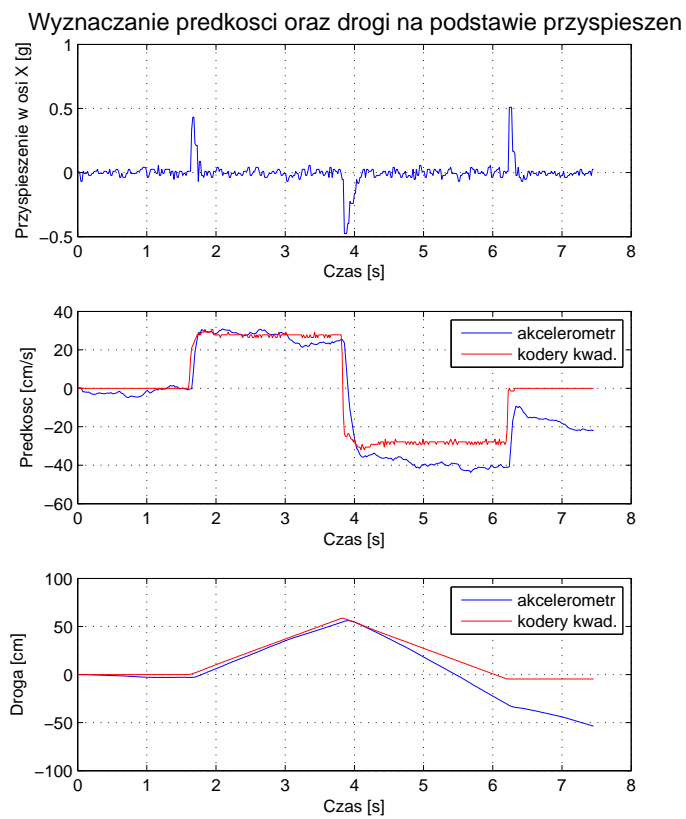
4.3.5 Wpływ sposobu sterowania na akcelerometr MMA7455L

Badania wpływu sposobu sterowania przeprowadzono z użyciem filtru uśredniającego bez wykorzystania filtru mechanicznego. Wykreślono charakterystyki dla sterowania platformą w sposób trapezowy oraz skokowy.

Rysunek 4.23 przedstawia wyniki dla sterowania trapezowego, zaś rysunek 4.24 dla sterowania skokowego. Analizując charakterystyki przyspieszeń dla obu sterowań można zauważyć, że dla sterowania skokowego charakterystyka jest bardziej gładka. Wynika to z faktu, że dla takiego sterowania przyspieszenia przyjmują większe wartości (osiągają nawet ćwierć zakresu akcelerometru) natomiast szumy towarzyszące ruchowi jednostajnemu pozostają na takim samym poziomie jak w przypadku sterowania trapezowego. W efekcie szumy bardziej wpływają na mniejsze przyspieszenia dlatego większe błędy występują w przypadku sterowania trapezowego. Na wykresie przedstawiającym sterowanie skokowe można zauważyć inne nachylenie charakterystyki prędkości przy zmianie kierunku. Charakterystyka prędkości pochodzących z koderów kwadraturowych jest bardziej stroma przy zmianie prędkości. Wynika to z poślizgu kół podczas zmiany kierunku robota.



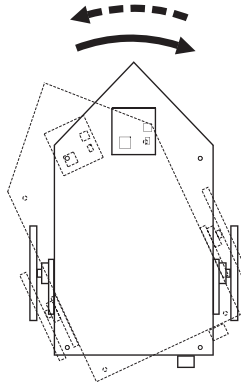
Rysunek 4.23 Ruch robota przy sterowaniu trapezowym



Rysunek 4.24 Ruch robota przy sterowaniu skokowym

4.4 Wyznaczanie prędkości kątowej platformy mobilnej za pomocą akcelerometru

Badania przeprowadzono dla ruchu obrotowego platformy (wokół środka osi) w prawo, a następnie w lewo bez zatrzymania przy zmianie kierunku (rysunek 4.25). Mierzono przyspieszenia w osiach X i Y za pomocą akcelerometrów oraz prędkości kątowe za pomocą żyroskopu. Wykorzystując zależności przedstawione we wzorze 2.17, wyznaczono moduły prędkości kątowej platformy.



Rysunek 4.25 Ruch robota po okręgu

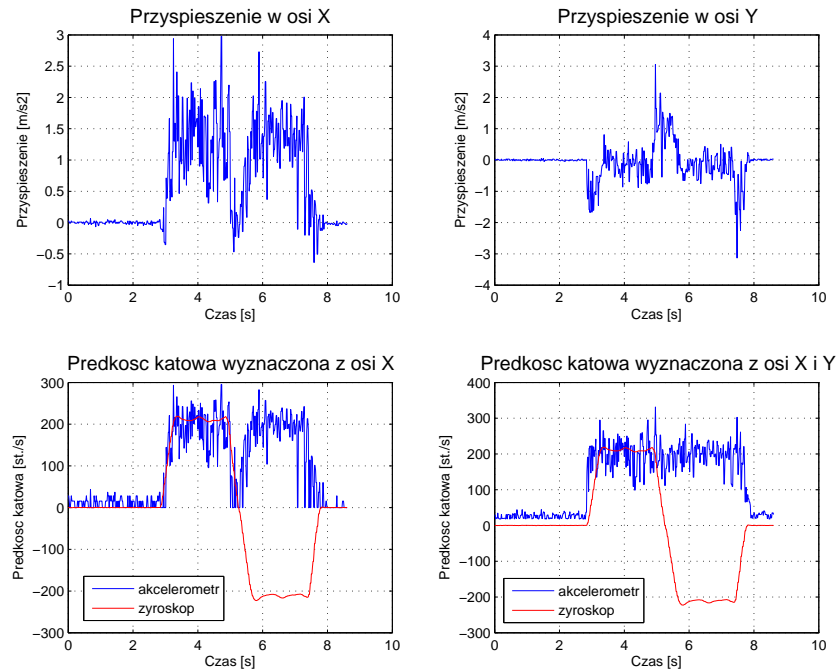
Przyspieszenie odśrodkowe wyznaczono na dwa sposoby. W pierwszym wykorzystano pomiary z osi X akcelerometru oraz znaną odległość akcelerometru od środka osi robota (promień). W drugim przypadku, obliczeń dokonano w oparciu o pomiary z obu osi (X,Y) akcelerometru. Dokładny opis wyznaczania prędkości kątowej znajduje się w rozdziale 2.3. Obliczone prędkości porównano z pomiarami pochodzącymi z żyroskopu.

Przebadano w ten sposób dwa akcelerometry: MMA6270 i MMA7455L, a porównania dokonano z wartościami zmierzonymi przez żyroskop ADIS16100. Sterowano platformą w sposób skokowy oraz trapezowy. Badania przeprowadzono dla różnych filtrów podobnie jak w poprzednich eksperymentach.

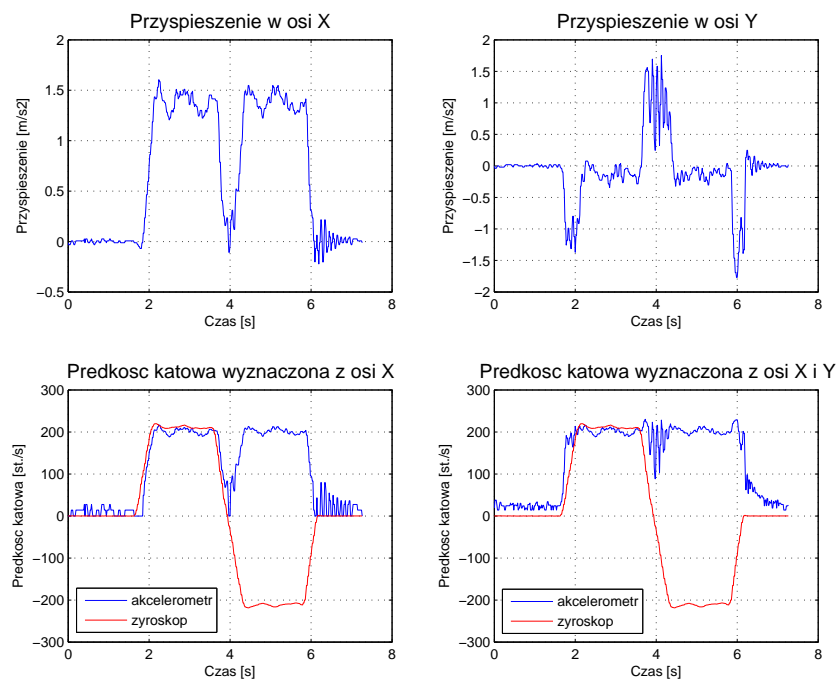
4.4.1 Wpływ filtru analogowego na wyznaczanie prędkości kątowej za pomocą akcelerometru MMA6270

Badania przeprowadzono z użyciem filtru mechanicznego oraz cyfrowego, uśredniającego przy sterowaniu trapezowym. Wykreślono charakterystyki dla dwóch różnych częstotliwości odcięcia filtru analogowego

Rysunek 4.26 przedstawia pomiary z filtrem analogowym 200Hz, a rysunek 4.27 ukazuje wyniki dla filtru analogowego 10Hz. Eksperyment pokazuje że filtr analogowy ma duży wpływ na pomiary. Dużo lepiej wygląda charakterystyka dla częstotliwości odcięcia 10Hz. Charakterystyka prędkości kątowej, w tym przypadku obliczona wykorzystując pomiary z osi X akcelerometru oraz promień obrotu robota, pokrywa się z charakterystyką zmierzoną przez żyroskop z małym błędem. W przypadku obliczania prędkości kątowej z obu składowych (X i Y) akcelerometru, wynik jest dużo gorszy - charakterystyki pokrywają się z dużym błędem oraz nie widać zatrzymania (zmiany kierunku) robota. Dla częstotliwości odcięcia 200Hz pomiary wyglądają podobnie lecz są bardzo zaszumione i trudno odczytać z nich moduł prędkości kątowej.



Rysunek 4.26 Działanie filtra analogowego dla częstotliwości odcięcia 200Hz

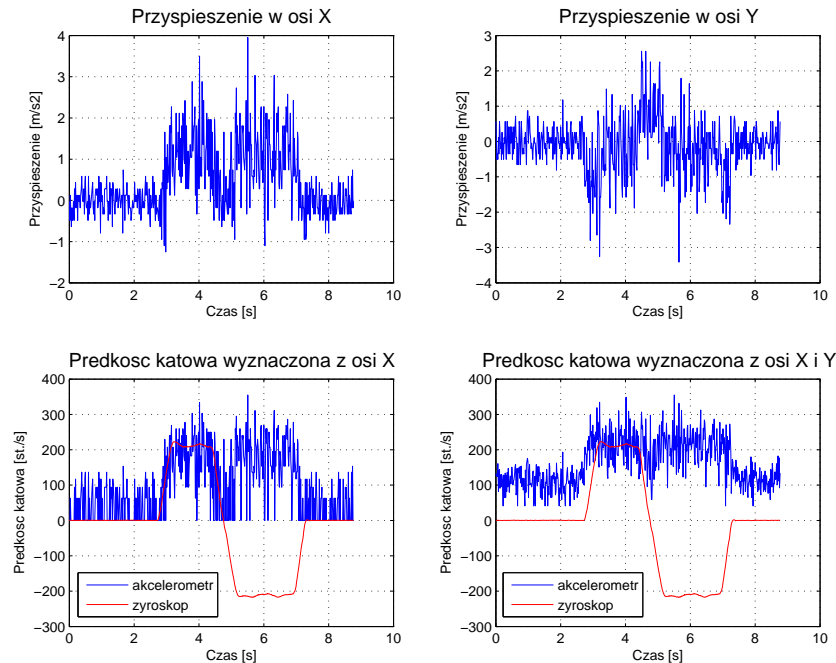


Rysunek 4.27 Działanie filtra analogowego dla częstotliwości odcięcia 10Hz

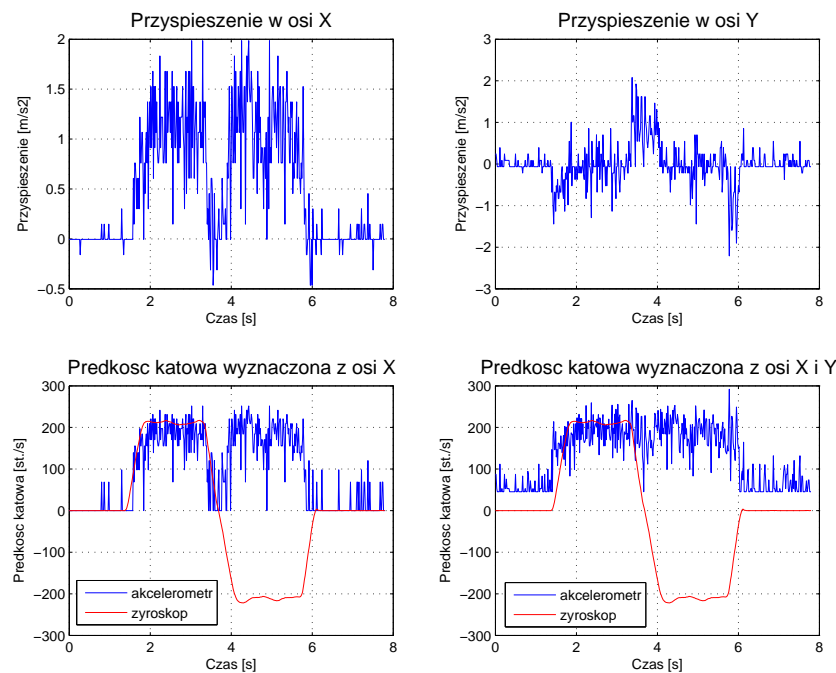
4.4.2 Wpływ filtra cyfrowego na wyznaczanie prędkości kątowej za pomocą akcelometru MMA7455L

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem filtra mechanicznego przy sterowaniu trapezowym. Wykreślono charakterystyki dla dwóch filtrów cyfrowych: opóźniającego i uśredniającego oraz bez filtracji cyfrowej.

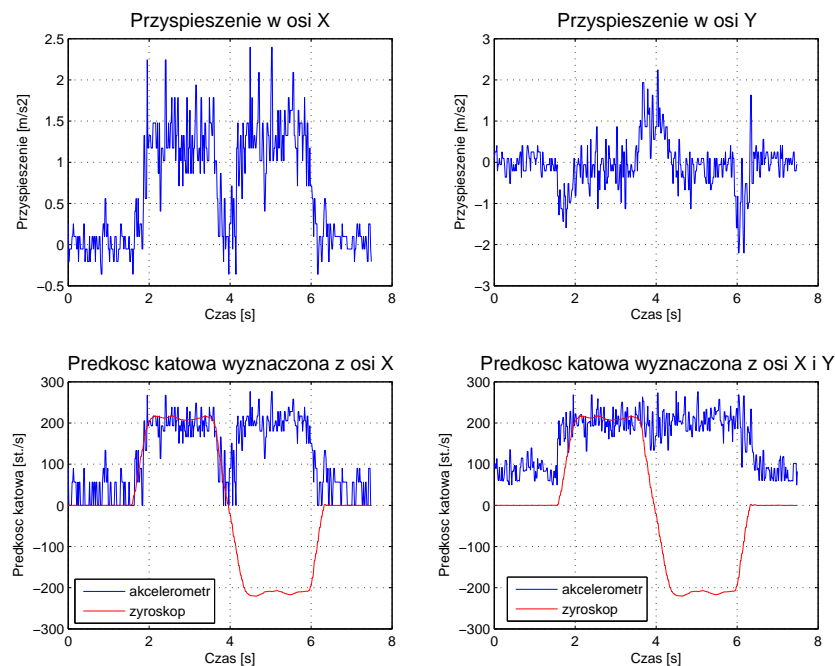
Na rysunku 4.28 przedstawiono pomiary bez filtru cyfrowego natomiast na rysunkach 4.29, 4.30 zobrazowano działanie filtru opóźniającego i uśredniającego. Użycie w tym przypadku dostępnych filtrów cyfrowych niewiele wpływa na poprawę jakości pomiarów. Pomiary z filtrem uśredniającym wyglądają najlepiej, lecz trudno z nich odczytać moduł prędkości kątovej. Można go jedynie oszacować.



Rysunek 4.28 Ruch robota bez filtracji cyfrowej



Rysunek 4.29 Działanie filtru opóźniającego



Rysunek 4.30 Działanie filtra uśredniającego

4.5 Wyznaczanie orientacji platformy mobilnej za pomocą żyroskopu

Badania przeprowadzono dla ruchu obrotowego platformy (wokół środka osi) w prawo, a następnie w lewo bez zatrzymania przy zmianie kierunku (rysunek 4.25). Mierzono prędkości kątowe za pomocą żyroskopu oraz orientację robota wyznaczaną na podstawie pomiarów z kodery kwadraturowych oraz optycznego czujnika przemieszczenia.

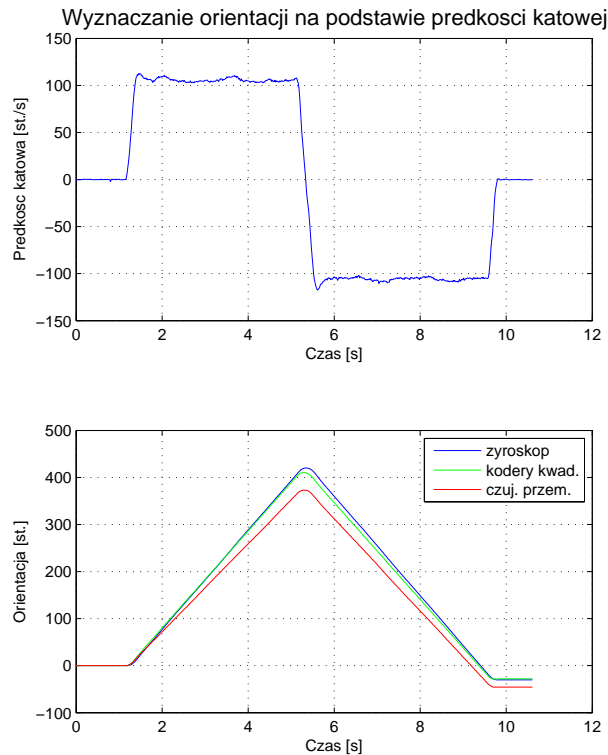
W celu uzyskania orientacji z żyroskopu, scałkowano charakterystykę prędkości kątowej. Wyniki porównano z wartościami zmierzonymi przez kodery kwadraturowe i czujnik przemieszczenia. Sterowanie platformą odbywało się w sposób skokowy oraz trapezowy. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem filtra mechanicznego oraz bez niego, a także dla różnych filtrów cyfrowych.

4.5.1 Wpływ filtra cyfrowego na wyznaczanie orientacji platformy mobilnej przy pomocy żyroskopu ADIS16100

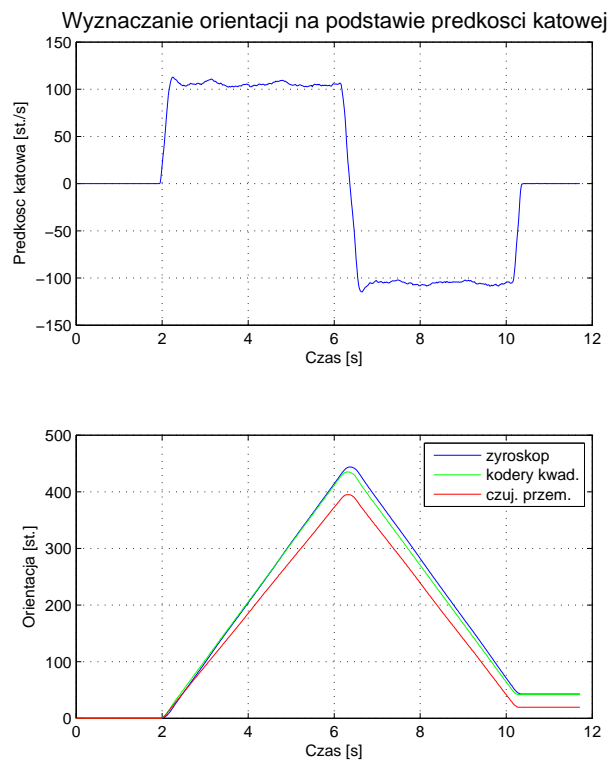
Badania przeprowadzono z wykorzystaniem filtra mechanicznego przy sterowaniu trapezowym. Wykreślono charakterystyki dla dwóch filtrów cyfrowych: opóźniającego i uśredniającego oraz bez filtracji cyfrowej.

Na rysunku 4.31 przedstawiono pomiary bez filtra cyfrowego natomiast na rysunkach 4.32, 4.33 zobrazowano działanie filtra opóźniającego i uśredniającego. Z badań wynika, że charakterystyki prędkości kątowej dla różnych filtrów cyfrowych wyglądają niemal identycznie. Prędkości kątowe oraz gładkość tych charakterystyk utrzymuje się na jednakowym poziomie dla wszystkich zastosowanych filtrów cyfrowych. Wyznaczone poprzez całkowanie przebiegi orientacji, dla wszystkich filtrów pokrywają z przebiegami orientacji zmierzonymi przez kodery kwadraturowe z małym błędem. Większe odstępstwa występują w przypadku porównywania z pomiarami pochodzącymi z optycznego czujnika

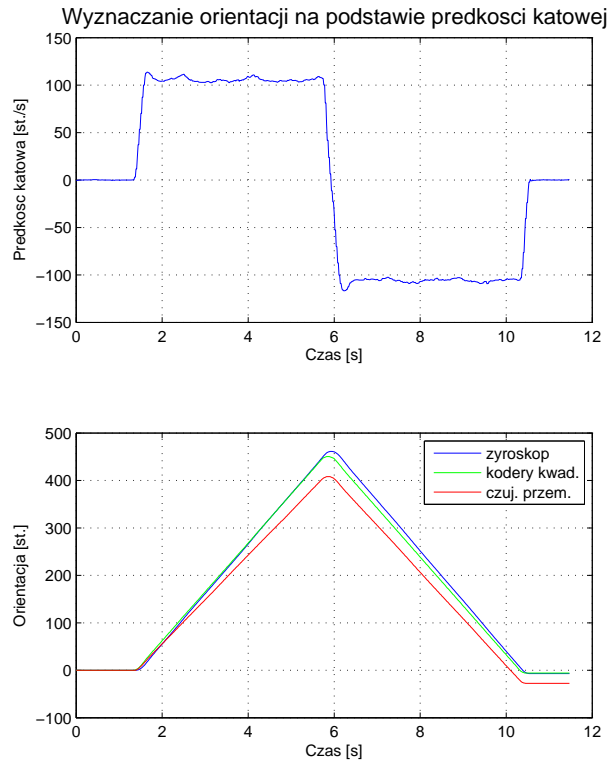
przemieszczenia, co nasuwa wniosek że pomiary z tego czujnika są obarczone błędem. W przypadku żyroskopu pomiary są na tyle dobre, że nie trzeba stosować dodatkowej filtracji cyfrowej. Wykorzystując bezpośrednie pomiary z żyroskopu ADIS16100 można wyznaczyć orientację z dużą dokładnością.



Rysunek 4.31 Ruch robota bez filtracji cyfrowej



Rysunek 4.32 Działanie filtru opóźniającego

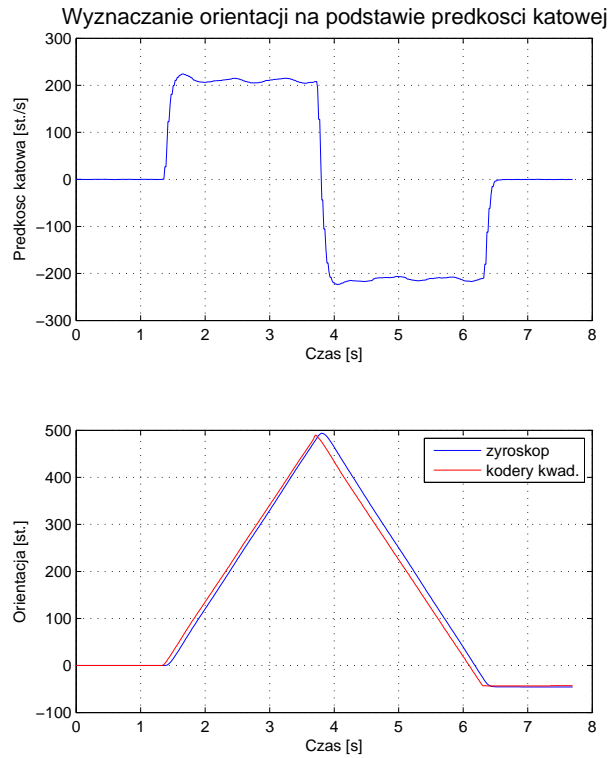


Rysunek 4.33 Działanie filtra uśredniającego

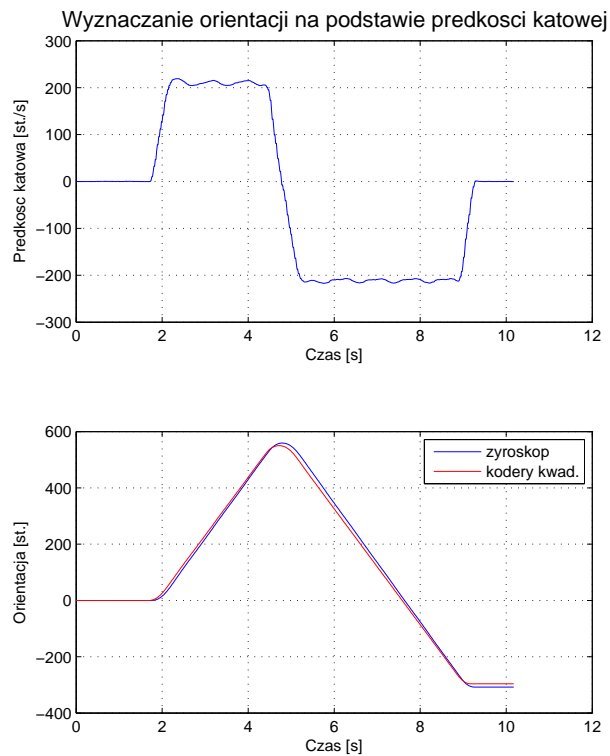
4.5.2 Wpływ sposobu sterowania na wyznaczanie orientacji platformy mobilnej przy pomocy żyroskopu ADIS16100

Badania przeprowadzono bez wykorzystania filtra mechanicznego z wykorzystaniem filtra cyfrowego. Wykreślono charakterystyki dla sterowania skokowego oraz trapezowego.

Rysunek 4.35 przedstawia charakterystyki wykreślone przy sterowaniu trapezowym natomiast rysunek 4.34 ukazuje efekty dla sterowania skokowego. Z nachylenia charakterystyk prędkości podczas zmiany kierunku ruchu robota można określić sposób sterowania. Wyraźnie widać że w przypadku sterowania skokowego nachylenie jest bardziej strome. Analizując wyznaczone poprzez całkowanie przebiegi orientacji można zauważyć, że dla sterowania skokowego występuje przesunięcie względem zmierzonego przebiegu orientacji oraz robot obrócił się bardziej w przypadku tego sterowania. Jest to błąd spowodowany poślizgiem kół podczas ruszania, zatrzymania i zmiany kierunku. Orientacja wyznaczona za pomocą żyroskopu jest obarczona mniejszym błędem gdyż poślizgi kół nie mają wpływu na pomiary.



Rysunek 4.34 Ruch robota przy sterowaniu skokowym



Rysunek 4.35 Ruch robota przy sterowaniu trapezowym

Rozdział 5

Podsumowanie

Praca miała na celu przedstawienie odbiorcy, problemów jakie występują przy wyznaczeniu lokalizacji robota mobilnego za pomocą czujników inercyjnych. Z przeprowadzonych badań wynika, że koniecznym zabiegiem przed korzystaniem z modułu INS jest kompensacja temperaturowa czujników, szczególnie w przypadku akcelerometrów, gdyż silna zależność wskazań od temperatury może powodować nasilanie się błędów przy dalszym wykorzystaniu sygnałów. Innym ważnym elementem początkowym jest kalibracja zera zarówno na poziomie programowym jak i mechanicznym (trymowanie). Źle wykalibrowany sensor również wprowadza błąd systematyczny który potęguje dalsze błędy.

Wyznaczanie drogi oraz prędkości z użyciem akcelerometru jest możliwe przy odpowiedniej filtracji. Z eksperymentów wynika, że bardzo dobrze na wyznaczenie tych wielkości wpływa użycie filtra analogowego. Filtry cyfrowe dodatkowo jeszcze poprawiają wyniki. Zgodnie z przewidywaniami filtracja cyfrowa sprawdza się tylko z użyciem filtra analogowego. Same filtry cyfrowe niewiele poprawiają wyniki. Najlepsze wyniki w tym eksperymencie otrzymano przy częstotliwości filtra analogowego 5Hz oraz opóźniającym filtrze cyfrowym (rysunek 4.19). Jednak nawet w przypadku najlepszych wyników, występują błędy całkowania. Dlatego, o ile na krótkich dystansach błąd jest pomijalnie mały, o tyle na większych dystansach błędy całkowania mogłyby znacznie wzrosnąć i przyjąć wartości nawet powyżej 100%. Dlatego używanie akcelerometrów do nawigacji ma sens jeśli jest to element systemu współpracujący również z innymi czujnikami.

Wyniki badań wykazują, że użycie filtra mechanicznego nie poprawia, a wręcz pogorsza parametry modułu INS, gdyż wprowadza zakłócenia wynikające z drgań modułu. Drgania te mogą mieć pozytywne znaczenie w przypadku wykrywania np. zderzeń (krótkie wstrząsy o dużej amplitudzie), jednak nie w przypadku wyznaczenia prędkości czy drogi.

Wyznaczanie prędkości kątowej przy ruchu obrotowym za pomocą akcelerometru okazało się możliwe tylko w przypadku wykorzystania akcelerometru mającego możliwość filtracji na poziomie analogowym. Akcelerometr cyfrowy dawał mocno zaszumione wyniki. Prędkość odśrodkowa wyznaczana z jednej składowej akcelerometru i promienia obrotu dawała dużo lepsze wyniki niż prędkość wyznaczona z obu składowych akcelerometru. Być może dlatego, że zakłócenia z drugiej osi były duże, a sygnał użyteczny mały.

Bardzo dobre wyniki uzyskano podczas wyznaczenia orientacji przy pomocy żyroskopu. Błędy całkowania utrzymywały się na niskim poziomie, a porównywane charakterystyki niemal idealnie się pokrywały. Jednak błędy całkowania - podobnie jak przy wyznaczeniu prędkości i drogi - rosną wraz z ilością wykonanych przez robota obrotów.

Niekorzystnym zjawiskiem jakie napotkano było bardzo silne zakłócanie kompasu elek-

tronicznego przez magnesy umieszczone na osiach kół robota, przeznaczone dla magnetycznych koderów kwadraturowych. Pomimo tego że są umieszczone stosunkowo daleko od modułu INS, zakłócenia są na tyle duże, że odczyt kompasu jest niemożliwy. Spowodowało to wyeliminowanie możliwości przeprowadzenia części eksperymentów.

W ramach pracy przygotowano stanowisko laboratoryjne przydatne do badania nawigacji inercyjnej. Opracowano również przykładowe ćwiczenia w tym zakresie. Informacje niezbędne do przeprowadzenia ćwiczeń znajdują się w dodatkach E, F, G, H.

W ramach dalszego rozwoju pracy można się skupić na badaniach algorytmów rekursywnej filtracji oraz na usprawnieniach części konstrukcyjnej robota. Filtracja rekursywna na ogół wymaga stosunkowo dużej mocy obliczeniowej dlatego mogłaby zaistnieć potrzeba wymiany głównego sterownika na wydajniejszy (np. następcą MC68332 z rodziny *Cold-Fire*). Z uwagi na silne zakłócenia kompasu polem magnetycznym z czujników obrotów kół należałoby wymienić je np. na czujniki optyczne.

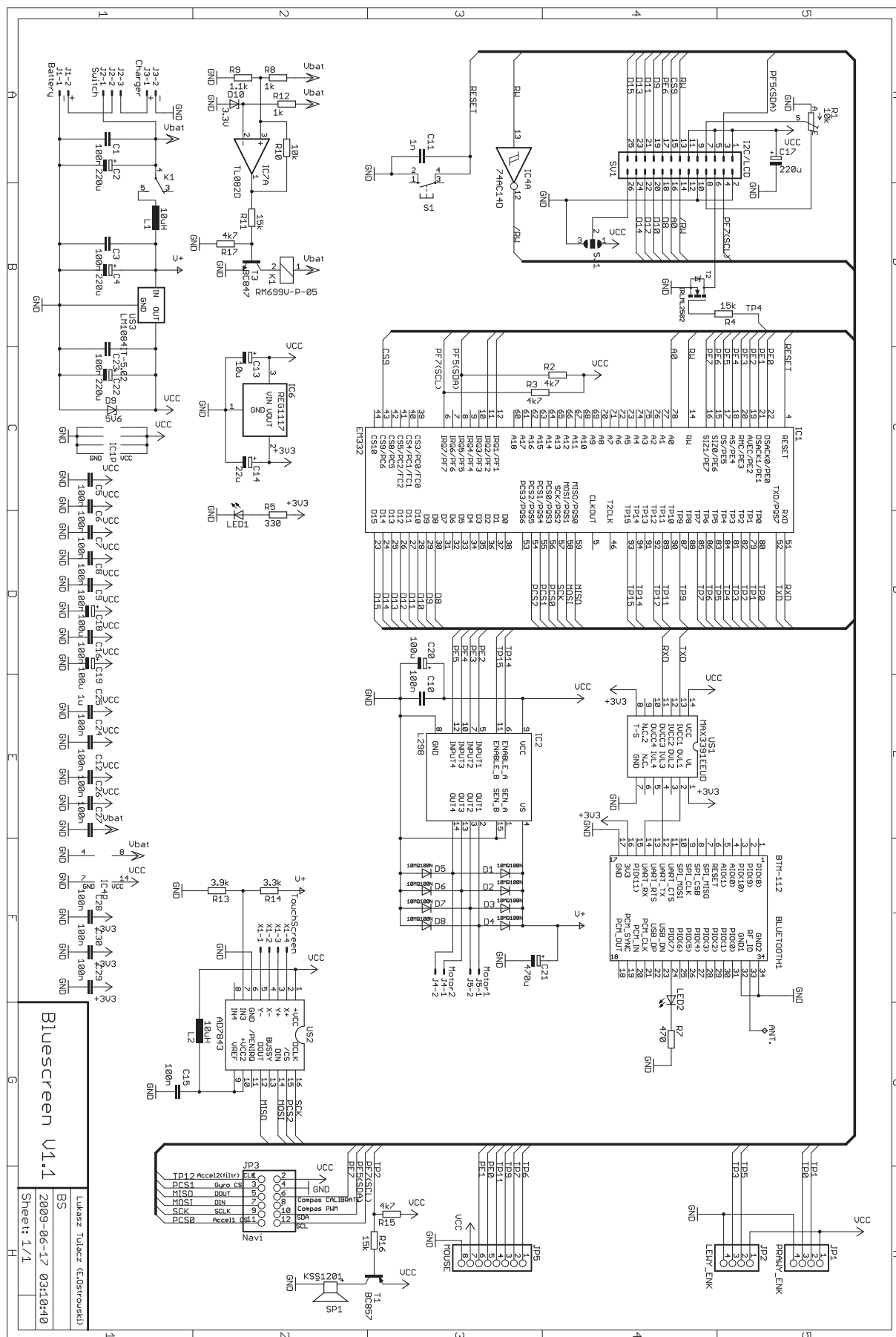
Bibliografia

- [1] TCHOŃ K. i inni, *Manipulatory i roboty mobilne: modele, planowanie ruchu, sterowanie*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 2000.
- [2] WNUK M. *Moduł z Mikrokontrolerem MC68332, Raport ICT serii 07/2004*, Wrocław, 2004.
- [3] KĘDZIERSKI J. OSTROWSKI E. *Enkoder magnetyczny AS5040*, Raport Koła Naukowego Robotyków „KoNaR” 2007.
- [4] KĘDZIERSKI J. OSTROWSKI E. *Optyczny czujnik przemieszczenia*, Raport Koła Naukowego Robotyków „KoNaR” 2007.
- [5] KĘDZIERSKI J. OSTROWSKI E. *Rozpoznawanie zdarzeń za pomocą czujnika optycznego z myszki w robocie mobilnym*, Raport Koła Naukowego Robotyków „KoNaR” 2007.
- [6] KĘDZIERSKI J. OSTROWSKI E. *Proste metody obsługi akcelerometrów - zastosowanie w robotach mobilnych na przykładzie ADXL202 oraz MMA7260.*, Raport Koła Naukowego Robotyków „KoNaR” 2007.
- [7] KĘDZIERSKI J. OSTROWSKI E. *Sterowanie wyświetlaczem graficznym z kontrolerem firmy Toshiba T6963C*, Raport Koła Naukowego Robotyków „KoNaR” 2007.
- [8] *Toshiba CMOS digital integrated circuit silicon monolithic T6963C*, Toshiba Corporation, 000707EBA1, 2001-02-28.
- [9] KĘDZIERSKI J. OSTROWSKI E. *βBOT Control Center*, Raport Koła Naukowego Robotyków „KoNaR” 2007.
- [10] ŁYSAKOWSKA B., MZYK. G. *Komputerowa symulacja układów automatycznej regulacji w środowisku MATLAB/Simulink*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [11] *MC68332 User's Manual*, MC68332UM/AD Rev. 1, Motorola Inc., 1993.
- [12] *±1.5g - 6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer*, Freescale Semiconductor, Technical Data, Rev 5, 03/2008.
- [13] *±2g/±4g/±8g Three Axis Low-g Digital Output Accelerometer*, Freescale Semiconductor, Technical Data, Rev 5, 11/2008.
- [14] *Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers*, Freescale Semiconductor, Application Note AN3397, Rev 0, 02/2007.

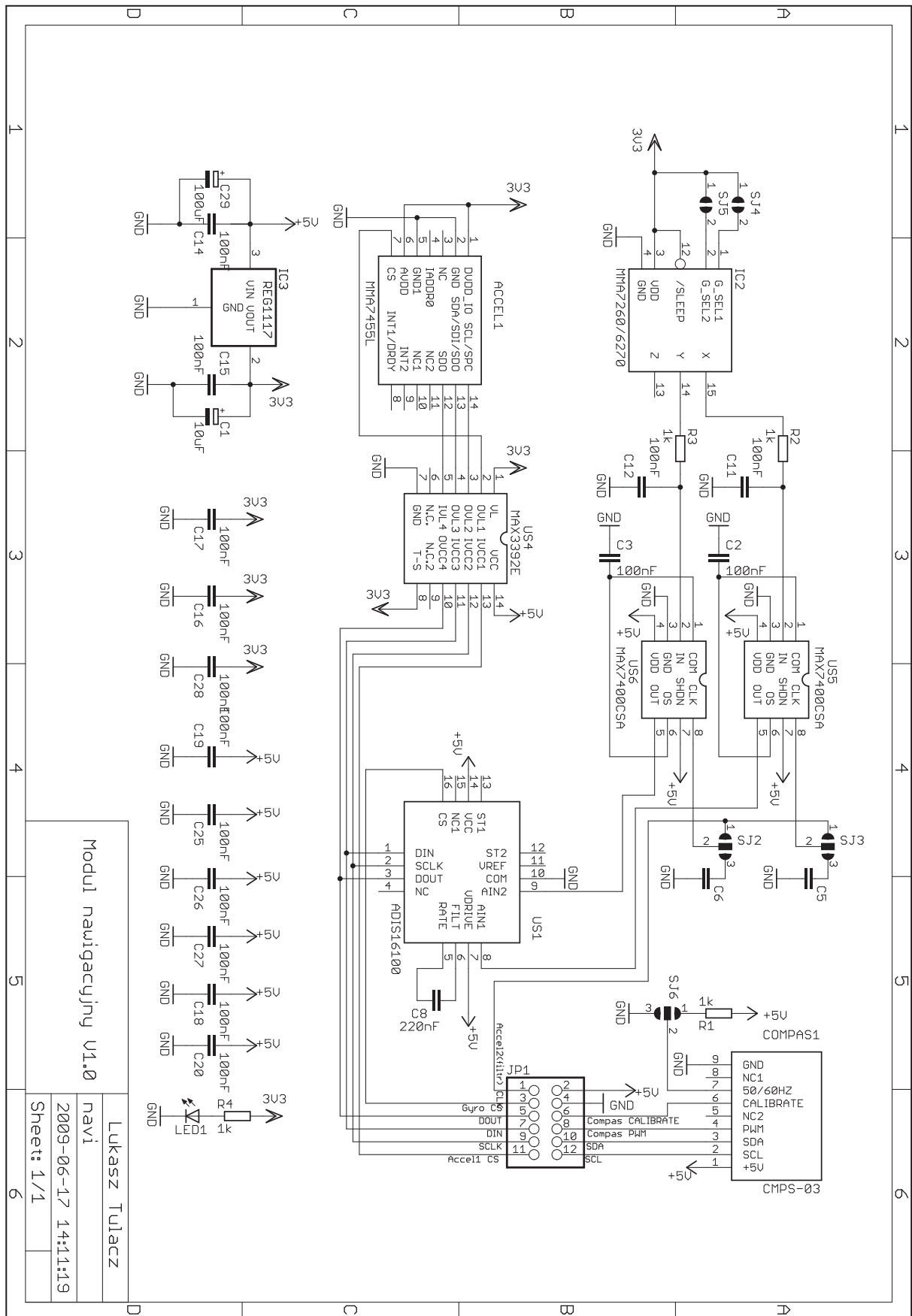
-
- [15] *How to Calibrate 0g Offset for the MMA745xL Family*, Freescale Semiconductor, Application Note AN3745, Rev 0, 07/2008.
- [16] *8th-Order, Lowpass, Elliptic, Switched-Capacitor Filters*, Maxim, 19-4764, Rev 2, 6/99.
- [17] *Touch Screen Digitizer*, Analog Devices, Technical Data, C02144-0-3/04(B), 2004.
- [18] *$\pm 300^\circ/\text{sec}$ Yaw Rate Gyroscope with SPI*, Analog Devices, Technical Data, D05461-0-1/08(C), 2006 - 2008.
- [19] *Class2 BC04-ext Bluetooth Module BTM-112*, Product Notice, BQ10016907, Jun 6, 2006.
- [20] <http://www.robot-electronics.co.uk/htm/cmeps3doc.htm>, CMPS03 - Robot Compass Module Rev14 March 2007
- [21] <http://www.austriamicrosystems.com>, AS5040 DataSheet Rev 1.6 2006.

Dodatek A

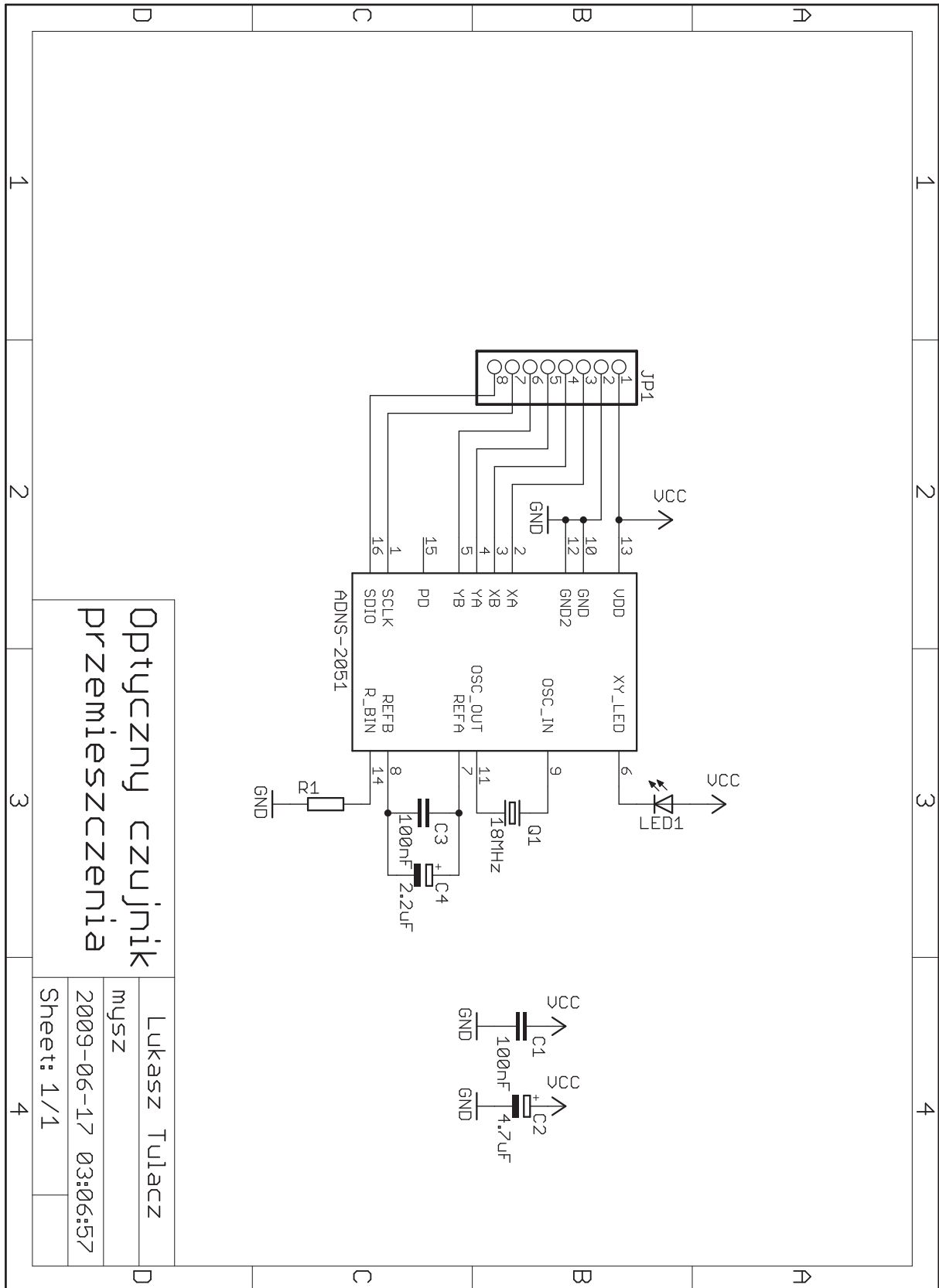
Schematy



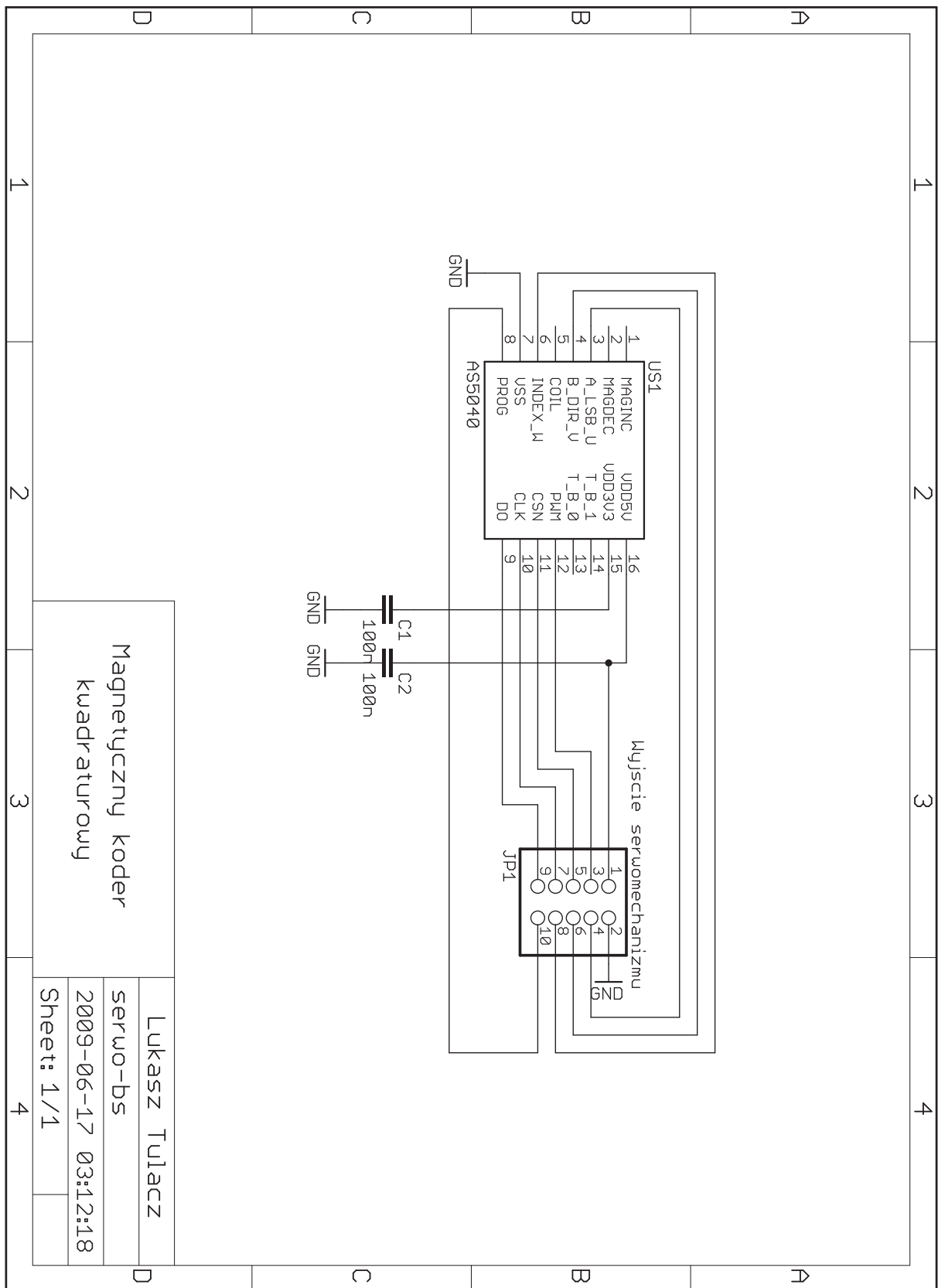
Rysunek A.1 Schemat ideowy robota BlueScreen V2



Rysunek A.2 Schemat ideowy modułu nawigacyjnego



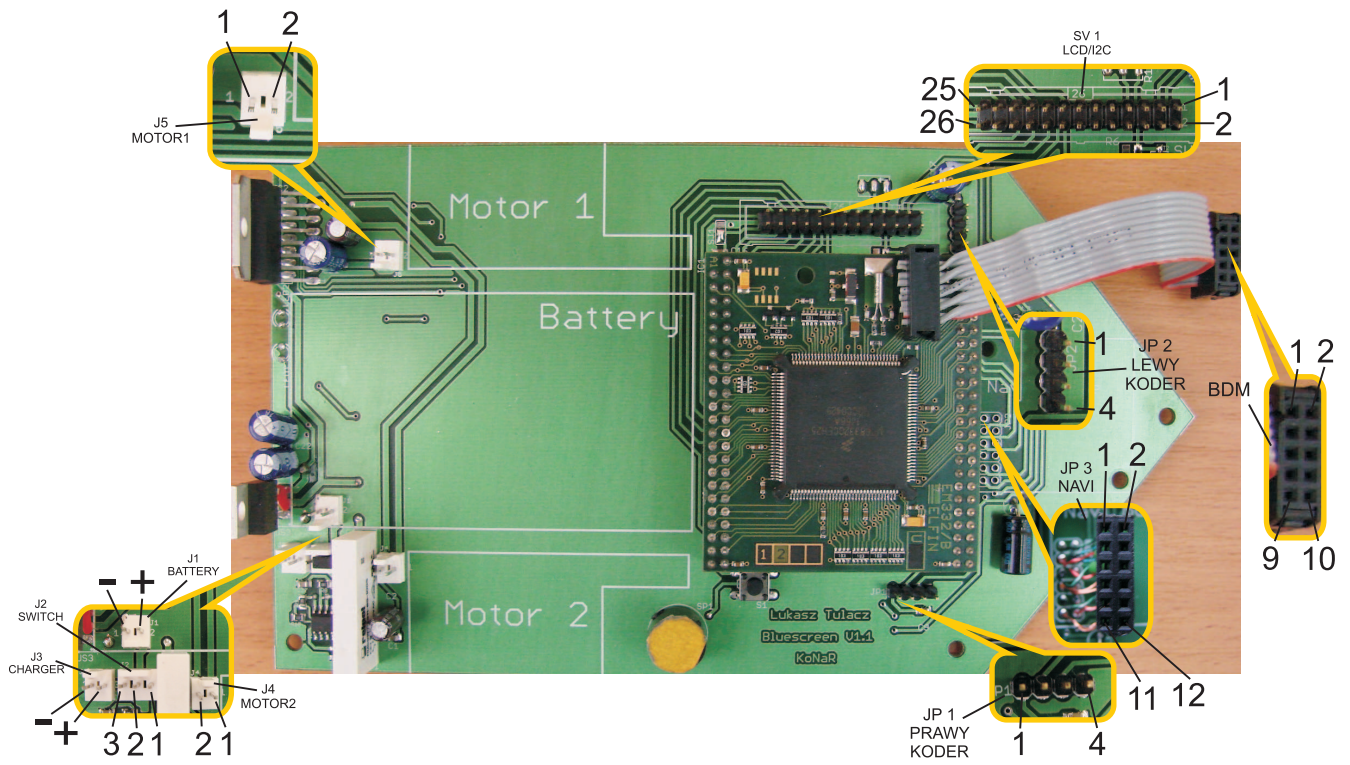
Rysunek A.3 Schemat ideowy optycznego czujnika przemieszczenia



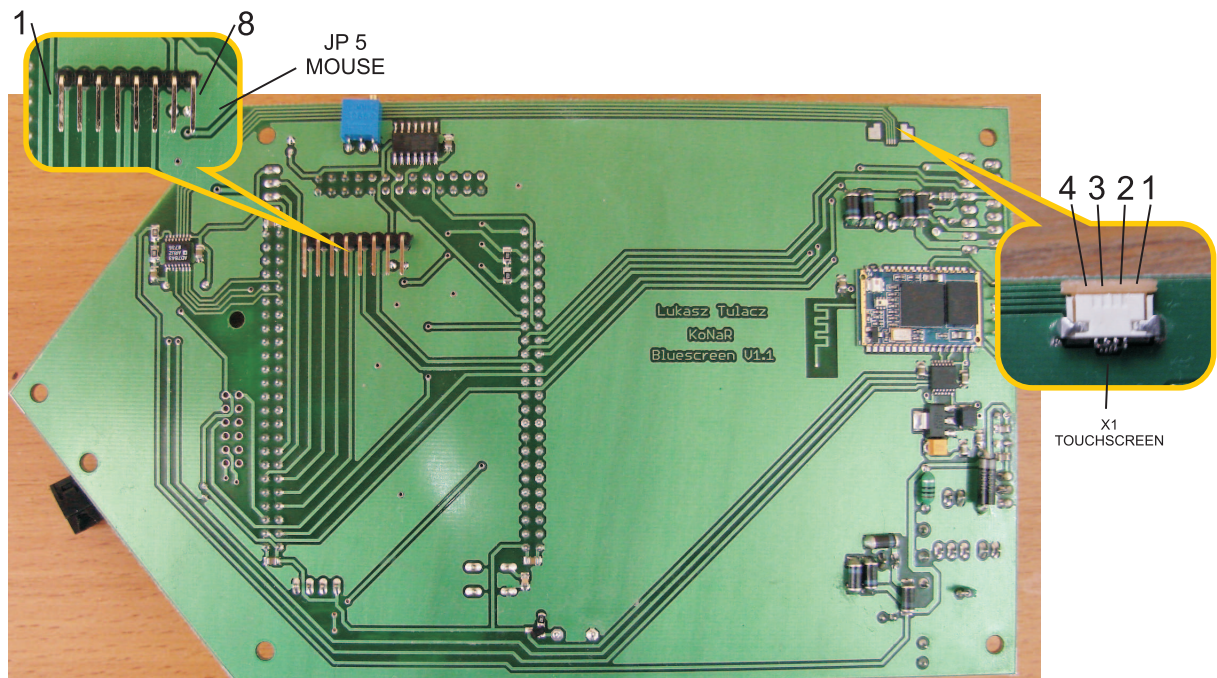
Rysunek A.4 Schemat ideowy magnetycznego kodera kwadraturowego AS5040

Dodatek B

Opis złącz płyty głównej



Rysunek B.1 Płyta główna robota BlueScreen V2, widok z góry



Rysunek B.2 Płyta główna robota BlueScreen V2, widok z dołu

Złącze/ nr wyp. (płyta gł.)	Złącze/ nr wyp. (połączenie)	Opis złącza (płyta główna)
JP1 Prawy koder	JP1 (Silnik prawy)	złącze prawego kodera kwadraturowego
1	1	zasilanie płytki kodera +5V
2	4	wejście kwadraturowa A
3	6	wejście kwadraturowe B
4	2	masa zasilania GND
JP2 Lewy koder	JP1 (Silnik lewy)	złącze lewego kodera kwadraturowego
1	1	zasilanie płytki kodera +5V
2	4	wejście kwadraturowa B
3	6	wejście kwadraturowe A
4	2	masa zasilania GND
JP3 Navi	JP1 (Moduł nawig.)	złącze modułu nawigacyjnego
1	1	wyjście zegara dla filtru analogowego A2-CLK
2	2	zasilanie +5V
3	3	sygnał wyboru G-CS żyroskopu (SPI)
4	4	masa zasilania GND
5	5	wejście danych MISO (SPI)
6	6	wyjście kalibracji kompasu
7	7	wyjście danych MOSI (SPI)
8	8	niepodłączone
9	9	wyjście zegara SCLK (SPI)
10	10	dane SDA (I ² C)
11	11	sygnał wyboru A1-CS akcelerometru 1 (SPI)
12	12	zegar SCL (I ² C)
SV1 LCD/I ² C	Złącze wyświetlacza	złącze wyświetlacza graficznego
1	-	zasilanie +5V
2	-	masa zasilania GND
3	-	dane SDA (I ² C)
4	-	zegar SCL (I ² C)
5	1	zasilanie podświetlania +5V
6	2	masa podświetlania
7	4	wejście napięcia -15V (dla dzielnika)
8	3	wyjście ujemnego napięcia (z dzielnika)
9	5	niepodłączone
10	6	masa zasilania GND
11	7	zasilanie +5V
12	8	niepodłączone
13	9	wyjście uaktywniające zapis
14	10	wyjście uaktywniające odczyt (negacja poprzedniego)
15	11	wyjście wyboru wyświetlacza
16	12	wyjście wyboru rejestru (danych/sterujący)
17	13	wyjście resetu wyświetlacza
18 - 25	14 - 21	linie danych
26	22	wyjście wyboru czcionki

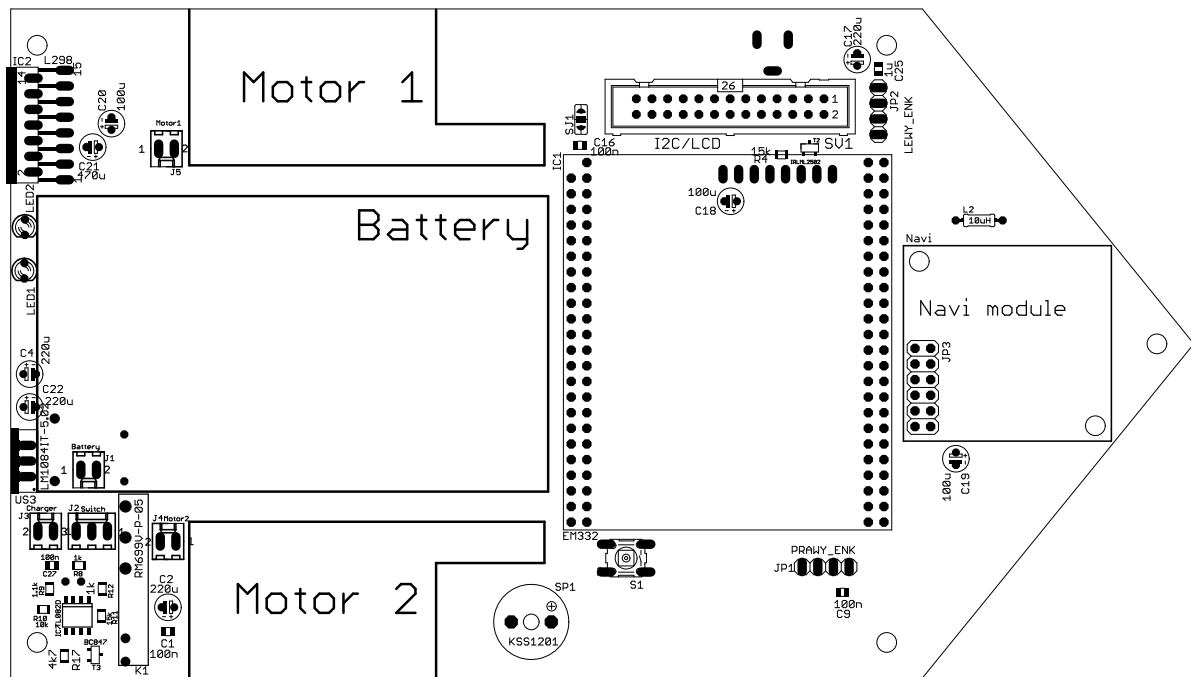
Tabela. B.1 Opis złącz płyty głównej robota BlueScreen V2, cz. 1

Złącze/ nr wyp. (płyta gł.)	Złącze/ nr wyp. (połączenie)	Opis złącza (płyta główna)
BDM	-	złącze debugera BDM (<i>Background Debug Mode</i>)
1	-	DS
2	-	BERR
3	-	GND
4	-	BKPT/DSCLK
5	-	GND
6	-	FREEZE
7	-	RESET
8	-	IFETCH/DSI
9	-	VDD
10	-	IPIPE/DSO
J1 Battery	Akumulator	złącze akumulatora zasilającego
J2 Switch	Przełącznik	złącze przełącznika włącz/wyłącz (ładowanie)
-	2 – 1	robot włączony (ładowanie niemożliwe)
-	2 – 3	robot wyłączony (ładowanie możliwe)
J3 Charger	Ładowarka	złącze ładowarki
J4 Motor2	Silnik prawy	złącze silnika prawego
1	wyp. silnika	zasilanie silnika
2	wyp. silnika	zasilanie silnika
J5 Motor1	Silnik lewy	złącze silnika lewego
1	wyp. silnika	zasilanie silnika
2	wyp. silnika	zasilanie silnika
JP5 Mouse	JP1 (Op. cz. przm.)	złącze optycznego czujnika przemieszczenia
1	3	wejście kwadraturowe X-A
2	4	wejście kwadraturowe X-B
3	5	wejście kwadraturowe Y-A
4	6	wejście kwadraturowe Y-B
5	7	wyjście zegara magistrali synchronicznej SCLK
6	8	dane magistrali synchronicznej SDIO
7	1	zasilanie czujnika +5V
8	2	masa zasilania GND
X1 TouchScreen	Złącze wyświetlacza	złącze panelu dotykowego
1	26	wejście Y-
2	25	wejście X-
3	24	wejście Y+
4	23	wejście X+

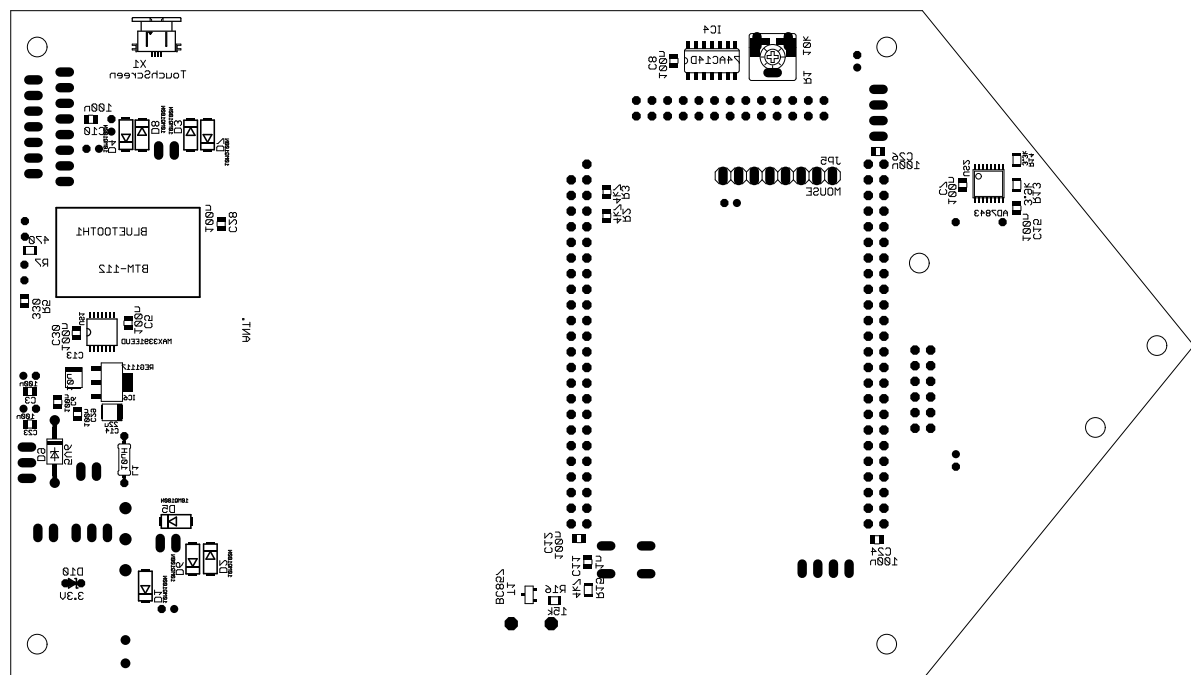
Tabela. B.2 Opis złącz płyty głównej robota BlueScreen V2, cz. 2

Dodatek C

Rozmieszczenie elementów na płytkach



Rysunek C.1 Rozmieszczenie elementów na płycie głównej, widok z góry



Rysunek C.2 Rozmieszczenie elementów na płycie głównej, widok z dołu

Nazwa	Wartość	Obudowa	Opis
BLUETOOTH1	BTM-112	BTM-112	moduł <i>Bluetooth</i>
C1	100n	C0805	kondensator
C2	220u	E2-4	kondensator elektrolityczny
C3	100n	C0805	kondensator
C4	220u	E2-4	kondensator elektrolityczny
C5	100n	C0805	kondensator
C6	100n	C0805	kondensator
C7	100n	C0805	kondensator
C8	100n	C0805	kondensator
C9	100n	C0805	kondensator
C10	100n	C0805	kondensator
C11	1n	C0805	kondensator
C12	100n	C0805	kondensator
C13	10u	SMC-B	kondensator tantalowy
C14	22u	SMC-B	kondensator tantalowy
C15	100n	C0805	kondensator
C16	100n	C0805	kondensator
C17	220u	E2-4	kondensator elektrolityczny
C18	100u	E2-4	kondensator elektrolityczny
C19	100u	E2-4	kondensator elektrolityczny
C20	100u	E2-4	kondensator elektrolityczny
C21	470u	E2-4	kondensator elektrolityczny
C22	220u	E2-4	kondensator elektrolityczny
C23	100n	C0805	kondensator
C24	100n	C0805	kondensator
C25	1u	C0805	kondensator
C26	100n	C0805	kondensator
C27	100n	C0805	kondensator
C28	100n	C0805	kondensator
C29	100n	C0805	kondensator
C30	100n	C0805	kondensator
D1	10MQ100N	SMD	dioda shottky
D2	10MQ100N	SMD	dioda shottky
D3	10MQ100N	SMD	dioda shottky
D4	10MQ100N	SMD	dioda shottky
D5	10MQ100N	SMD	dioda shottky
D6	10MQ100N	SMD	dioda shottky
D7	10MQ100N	SMD	dioda shottky
D8	10MQ100N	SMD	dioda shottky
D9	5V6	5mm	dioda zenera
D10	3.3V	2.5mm	dioda zenera
IC1	EM332	EM332	moduł z mikrokontrolerem MC68332

Nazwa	Wartość	Obudowa	Opis
IC2	L298	MULTIWATT-15	mostek mocy
IC4	74AC14D	SO14	układ scalony
IC6	REG1117	SOT223	stabilizator napięcia
IC7	TL082D	SO08	układ scalony
J1	Battery	1x02	złącze 2.54 mm
J2	Switch	1x03	złącze 2.54 mm
J3	Charger	1x02	złącze 2.54 mm
J4	Motor2	1x02	złącze 2.54 mm
J5	Motor1	1x02	złącze 2.54 mm
JP1	PRAWY_ENK	1X04	złącze 2.54 mm
JP2	LEWY_ENK	1X04	złącze 2.54 mm
JP3	Navi	2X06	złącze 2.54 mm
JP5	MOUSE	1X08	złącze 2.54 mm
K1	RM699V-P-05		przełącznik
L1	10uH	3mm	cewka
LED2		LED3MM	dioda świecąca
R1	10k	CA6V	potencjometr
R2	4k7	R0805	rezystor
R3	4k7	R0805	rezystor
R4	15k	M0805	rezystor
R5	330	R0805	rezystor
R7	470	M0805	rezystor
R8	1k	M0805	rezystor
R9	1.1k	M0805	rezystor
R10	10k	M0805	rezystor
R11	15k	M0805	rezystor
R12	1k	M0805	rezystor
R13	3.9k	M0805	rezystor
R14	3.3k	M0805	rezystor
R15	4k7	M0805	rezystor
R16	15k	M0805	rezystor
R17	4k7	M0805	rezystor
S1		switch	mikroprzełącznik
SP1	KSS1201		głośnik
SV1	I ² C/LCD	ML26	złącze 2.54 mm
T1	BC857	SOT23	tranzystor
T2	IRLML2502	SOT23	tranzystor
US1	MAX3391EEUD	TSSOP14	układ scalony
US2	AD7843	TSSOP16	układ scalony
US3	LM1084IT-5.02	TO-220	stabilizator napięcia
X1	TouchScreen	52745-0490	złącze typu FFC/FPC

Tabela. C.1 Spis elementów płyty głównej robota BlueScreen V2

Nazwa	Wartość	Obudowa	Opis
ACCEL1	MMA7455L	LGA14-5X3MM	akcelerometr 3-osiowy
C1	10uF	SMC-B	kondensator tantalowy
C2	100nF	C0805	kondensator
C3	100nF	C0805	kondensator
C5	-	C0805	kondensator
C6	-	C0805	kondensator
C8	220nF	C0805	kondensator
C11	100nF	C0805	kondensator
C12	100nF	C0805	kondensator
C14	100nF	C0805	kondensator
C15	100nF	C0805	kondensator
C16	100nF	C0805	kondensator
C17	100nF	C0805	kondensator
C18	100nF	C0805	kondensator
C19	100nF	C0805	kondensator
C20	100nF	C0805	kondensator
C25	100nF	C0805	kondensator
C26	100nF	C0805	kondensator
C27	100nF	C0805	kondensator
C28	100nF	C0805	kondensator
C29	100uF	SMC-B	kondensator tantalowy
COMPAS1	CMPS-03	CMPS-03	moduł kompasu elektronicznego
IC2	MMA7260/6270	QFN16-HS	akcelerometr 3/2-osiowy
IC3	REG1117	SOT223	stabilizator napięcia
JP1		2X06	złącze 2.54 mm
LED1	zielona	LED0805	dioda świecąca
R1	1k	R0805	rezystor
R2	1k	R0805	rezystor
R3	1k	R0805	rezystor
R4	1k	R0805	rezystor
US1	ADIS16100	LGA16	żyroskop 1-osiowy
US4	MAX3392E	TSSOP14	układ scalony
US5	MAX7400CSA	SO08	układ scalony (filtr dolnop.)
US6	MAX7400CSA	SO08	układ scalony (filtr dolnop.)

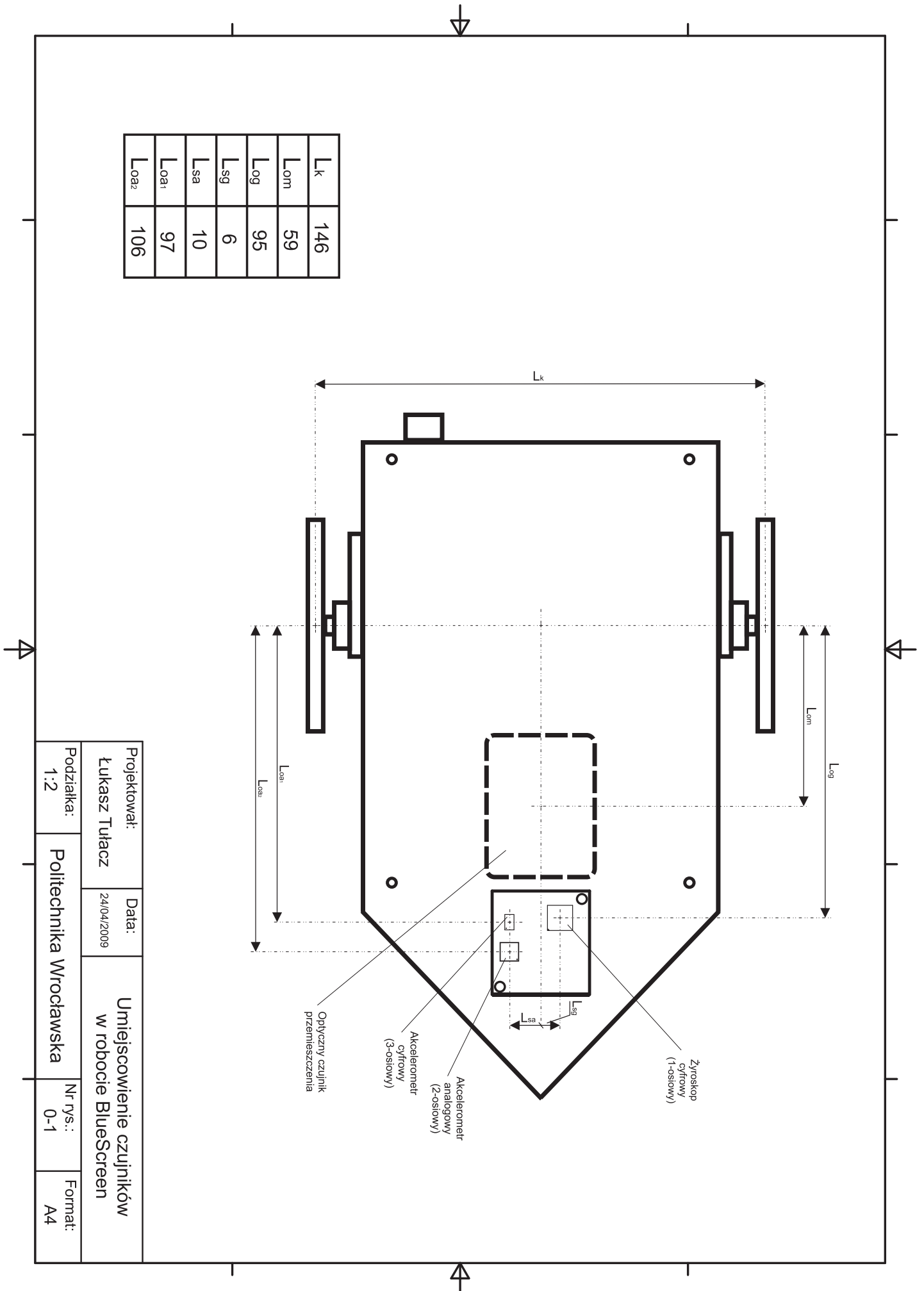
Tabela. C.2 Spis elementów modułu nawigacyjnego

Nazwa/ konfiguracja	Miejsce	Opis
SJ1	płyta główna	wybór czcionki wyświetlacza graficznego
2 – 1		czcionka wąska
2 – 3		czcionka szeroka
SJ2	moduł nawigacyjny	wybór źródła zegara filtru max7400 (oś Y)
2 – 1		zewnętrzne źródło zegara
2 – 3		wewnętrzny rezonator (kondensator)
SJ3	moduł nawigacyjny	wybór źródła zegara filtru max7400 (oś X)
2 – 1		zewnętrzne źródło zegara
2 – 3		wewnętrzny rezonator (kondensator)
SJ5, SJ4	moduł nawigacyjny	wybór zakresu akcelerometru MMA6270
0,0		1.5g
0,1		2g
1,0		4g
1,1		6g
SJ6	moduł nawigacyjny	wybór częst. sygnału w sieci elektrycznej
2 – 1		60 Hz
2 – 3		50 Hz

Tabela. C.3 Opis zwr robota BlueScreen V2

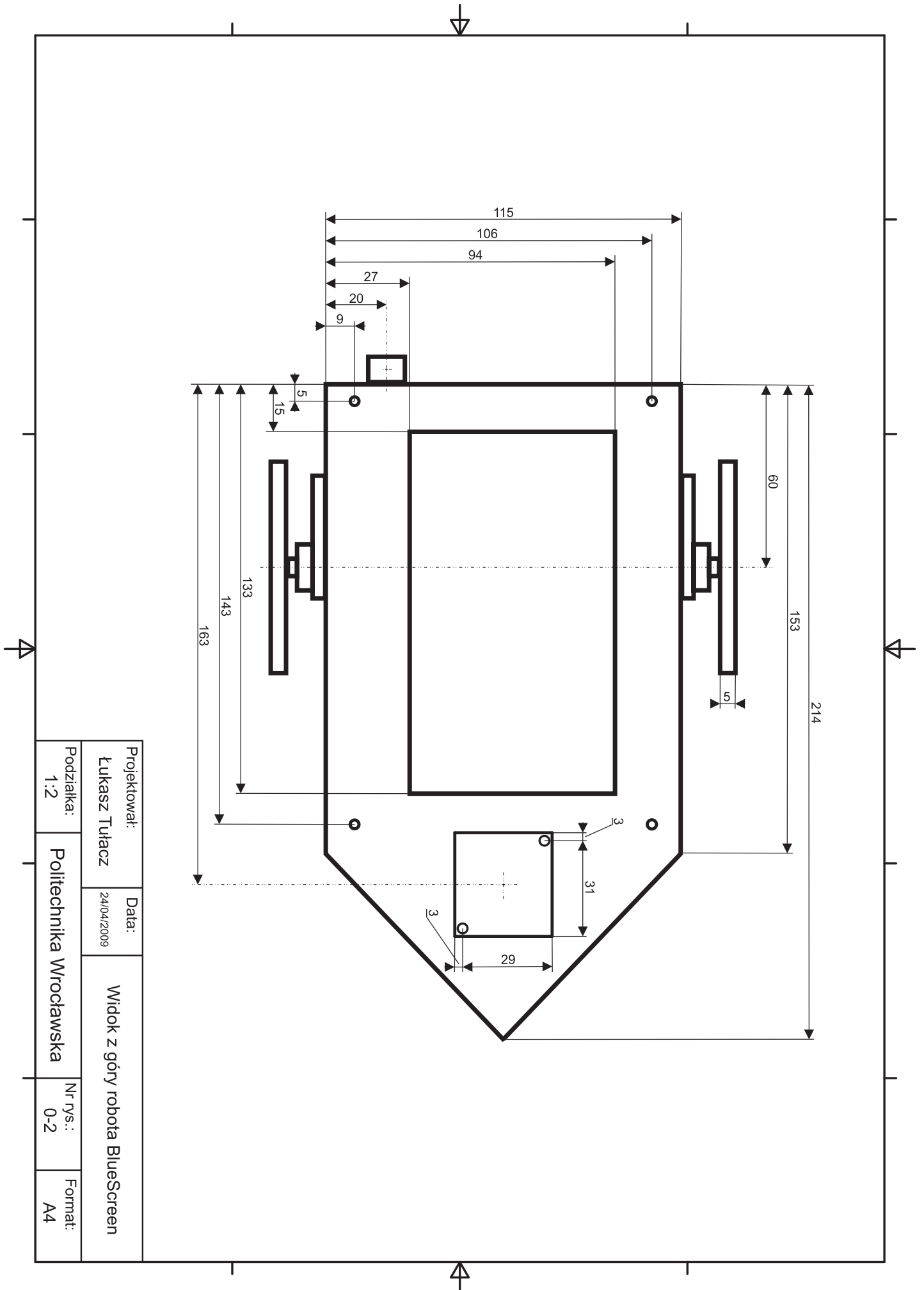
Dodatek D

Wymiary robota

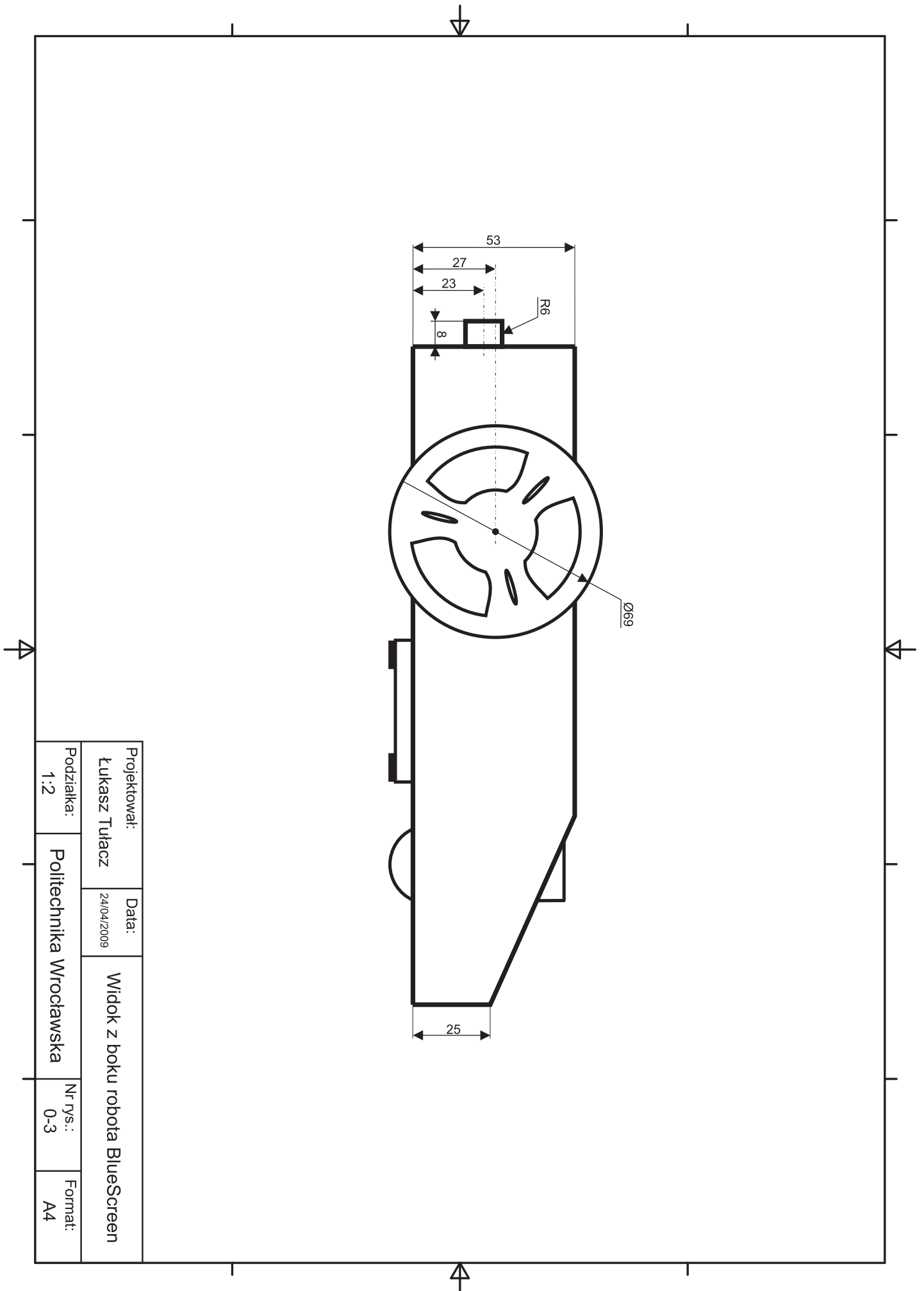


Projektował: Łukasz Tułacz	Data: 24/04/2009	Umiejscowienie czujników w robocie BlueScreen	
Podziałka: 1:2	Politechnika Wrocławska	Nr rys.: 0-1	Format: A4

Rysunek D.1 Umiejscowienie czujników w robocie



Rysunek D.2 Widok robota z góry



Rysunek D.3 Widok robota z boku

Dodatek E

Komendy robota BlueScreen V2

Komenda	Zwraca	Opis
go(V_{lin}, V_{kat})	%MC68k: OK.	zadanie prędkości liniowej i kątowej ($-40 \leq V_{lin} \leq 40, -40 \leq V_{kat} \leq 40$) [int]
stop	%MC68k: OK.	zatrzymanie napędów
OV	%ov(V_{lin}, V_{kat})	prędkości robota zmierzone czujnikiem optycznym
OP	%op(x, y, θ)	pozycja robota w globalnym układzie odniesienia
op(x, y, θ)	%MC68k: OK.	ustawienie pozycji robota w globalnym układzie odniesienia [float]
EV	%ev(V_{lin}, V_{kat})	prędkości robota zmierzone za pomocą koderów kwadraturowych
OEV	%oev($V_{lin}, V_{kat}, V_{lin}, V_{kat}$)	prędkości robota zmierzone za pomocą koderów i czujnika optycznego
WV	%wv(V_L, V_P)	prędkości kół zmierzone przy pomocy koderów kwadraturowych
WP	%wp(P_L, P_P)	pozycje kół zmierzone przy pomocy koderów kwadraturowych
wp(P_L, P_P)	%MC68k: OK.	ustawienie pozycji kół [float]
PID	%pid(K_p, K_d, K_i)	zwraca nastawy regulatorów PID
pid(K_p, K_d, K_i)	%MC68k: OK.	ustawia nastawy regulatorów PID ($0 \leq K_p, K_d, K_i \leq 100$) [int]
buz(time, tone)	%MC68k: OK.	wydawanie dźwięku przez platformę o zadanym czasie i zadanej tonacji ($1 \leq time \leq 255, 0 \leq tone \leq 80$) [int]
PG	$V_z, V_{km}, V_{kk}, \theta_m, \theta_k$;	wywołanie ciągu pomiarów: prędkości kątowe (żyroskop, myszka, kodery), orientacja (myszka, kodery)
PA1	A_x, A_y, A_z, P_P, V_P ;	wywołanie ciągu pomiarów: akcel. 1, pozycja i prędkość koła prawego
PK1	$A_x, A_y, A_z, \theta_k, V_z$;	wywołanie ciągu pomiarów: akcel. 1, orientacja i prędkość z żyroskopu
PA2	A_x, A_y, P_P, V_P ;	wywołanie ciągu pomiarów: akcel. 2
PK2	A_x, A_y, θ_k, V_z ;	pozycja i prędkość koła prawego wywołanie ciągu pomiarów: akcel. 2 orientacja i prędkość z żyroskopu
PS	%MC68k: stop	zatrzymanie ciągu pomiarów
Foff	%MC68k: Digital filter off	wyłączenie filtru cyfrowego
FS	%MC68k: Digital filter 1	włączenie filtru uśredniającego
FO	%MC68k: Digital filter 2	włączenie filtru opóźniającego
ff(freq)	%MC68k: Analog filter set	ustawienie częstot. filtru analogowego ($1 \leq freq \leq 1000$) [int]
br(bright)	%MC68k: Bright set	ustawienie jasności podświetlania wyświetlacza ($0 \leq bright \leq 100$) [int]
ka1(nr)	%MC68k: Calibrate Accel 1	kalibracja zera akcel. MMA7455L (nr=0 - domyślne, nr=1 - aktualne) [int]
ka2(nr)	%MC68k: Calibrate Accel 2	kalibracja zera akcel. MMA6270L (nr=0 - domyślne, nr=1 - aktualne) [int]
kag(nr)	%MC68k: Calibrate Gyro	kalibracja zera żyroskopu (nr=0 - domyślne, nr=1 - aktualne) [int]
tr(nr)	%MC68k: Controll set	wybór sterowania (nr=0 - skokowe, nr=1 - trapezowe) [int]

Tabela. E.1 Komendy robota BlueScreen V2

Dodatek F

Przygotowanie stanowiska laboratoryjnego

Przed przystąpieniem do badań robot powinien mieć naładowaną baterię (proces ładowania został opisany w rozdziale 3.6).

Po uruchomieniu robota (przełącznik na tylnym panelu), wyświetlacz powinien przedstawić obraz jak na rysunku F.1. Robot jest wtedy nieaktywny (wyłączone napędy) i nie można przesyłać z niego ciągów pomiarów do komputera. Uruchomienie napędów odbywa się poprzez dotknięcie wyświetlacza w miejscu pokazanym na rysunku F.1. Przedstawiono tam również miejsce gdzie należy dotknąć wyświetlacz aby wyłączyć napędy i możliwość przesyłania ciągu pomiarów. Obszary te są aktywne zawsze, niezależnie od tego co jest wyświetlane na wyświetlaczu.



Rysunek F.1 Obszary włączania i wyłączania napędów i ciągu pomiarów

Kiedy robot jest już aktywny, aby umożliwić komunikację z nim należy połączyć go z komputerem PC przez *Bluetooth*. Jeśli komputer, którym dysponujemy nie posiada wbudowanej karty *Bluetooth* należy użyć dołączonego do zestawu adaptera *Bluetooth* na USB. Dołączona do pracy płyta CD zawiera również sterowniki (Oprogramowanie/USB_Bluetooth_Adapter) niezbędne do uruchomienia adaptera.

Połączenie robota z komputerem odbywa się w standardowy dla komunikacji *Bluetooth* sposób. Należy wyszukać dostępne w pobliżu urządzenia. Wśród nich powinno znajdo-

wać się urządzenie o nazwie "Bluescreen". Należy połączyć się z nim poprzez usługę portu szeregowego (kod PIN "1234"). Po tej operacji powinniśmy otrzymać informację o numerze portu COM który został przyporządkowany do połączenia z robotem. Biała dioda na tylnym panelu robota powinna świecić w sposób ciągły. Oznacza to że występuje połączenie z robotem. Od tej chwili możliwa jest komunikacja poprzez transmisję szeregową. Do obsługi transmisji można posłużyć się dołączonym programem (Oprogramowanie/Terminal.exe). Umożliwia on sterowanie robotem oraz odbieranie ciągu pomiarów przesyłanych przez robota. Pomiarów te mogą zostać umieszczone w pliku jako znaki ASCII.

Przed wysłaniem komendy odpowiedzialnej za rozpoczęcie nadawania zamierzonych pomiarów należy odpowiednio ustawić parametry transmisji:

- numer portu COM podany przy połączeniu *Bluetooth*
- prędkość 57600b/s
- 8 bitów danych
- bez bitu parzystości
- 1 bit stopu
- bez potwierżeń

Po skonfigurowaniu parametrów należy wybrać przycisk "Connect". Od tej pory możliwe jest wysyłanie i odbieranie danych. Wszystkie dostępne komendy znajdują się w dołączonym pliku *makra.tmf*. Należy wczytać ten plik. W tym celu klikamy przycisk "Set Macros", a następnie w oknie które się pojawi klikamy "Load" i wybieramy ścieżkę dostępu do pliku *makra.tmf*. Dzięki temu wysłanie każdej komendy do robota możliwe jest poprzez kliknięcie na odpowiednie makro. Należy również pamiętać aby w terminalu, pole "Stream Log" zostało zaznaczone. Dzięki temu do pliku z danymi nie zostaną dopisane żadne dodatkowe informacje terminala.

Do sporządzenia wykresów używa się komend wywołujących serię pomiarów. Jednak przed przesłaniem takiej komendy należy skonfigurować robota odpowiednimi komendami z tabeli E.1 (rodzaj filtracji, sterowanie, kalibracja zera, zerowanie pozycji itp.) oraz utworzyć plik do którego pomiary będą trafiać. W tym celu należy w terminalu kliknąć przycisk "StartLog" oraz wybrać nazwę i ścieżkę dostępu pliku. Nazwa powinna mieć rozszerzenie *.m*. Po ukończeniu zbierania pomiarów należy wybrać przycisk "StopLog".

Rozpoczęcie serii pomiarów odbywa się wysyłając jedną z komend: *PG*, *PA1*, *PA2*, *PK1*, *PK2*, a zakończenie komendą *PS*. Znaczenie komend zostało przedstawione w tabeli E.1. Pomiędzy komendą rozpoczynającą serię pomiarów, a komendą zakańczającą ją używa się komend sterujących ruchem platformy.

Otrzymane wyniki znajdujące się w pliku można przedstawić w postaci wykresów przy pomocy środowiska Matlab. Sposób oglądania wykresów jest analogiczny do opisanego w dodatku G. Przy wywołaniu skryptów uruchomieniowych jako *współczynnik* zadajemy wartość 16.

Dodatek G

Podgląd wyników w programie Matlab

Nośnik CD dołączony do pracy zawiera wszystkie badania które przeprowadzono. Dołączono również skrypty umożliwiające szybki podgląd zebranych badań. Skrypty te zostały napisane w programie Matlab (wersja 7.5.0 - R2007b).

Aby wyświetlić wykresy należy uruchomić program Matlab, a następnie przekopiować folder "Badania" z płyty CD do jego katalogu roboczego (np. *C:/Documents and Settings/Moje dokumenty/MATLAB/Badania*). W katalogu "Badania" znajdują się dwa foldery zawierające wyniki badań oraz skrypty uruchomieniowe. Foldery te posiadają podfoldery o nazwach ułatwiających odszukanie pożądanego badania. Nazwy skryptów z badaniami również są specjalnie oznaczone. Poniżej wyjaśniono znaczenie poszczególnych części nazw plików zawierających wyniki badań.

czujnik/predkosc/filtr_c/filt_a/filtr_m/sterowanie/.m

- czujnik
 - a1* - akcelerometr MMA7455L
 - a2* - akcelerometr MMA6270
 - g* - żyroskop ADIS16100
- predkosc
 - lx* - prędkość linowa wyrażona w jednostkach robota bs ($0 \leq x \leq 30, 1bs \cong 1,4cm/s$)
 - kx* - prędkość kątowna wyrażona w jednostkach robota bs ($0 \leq x \leq 30, 1bs \cong 10,9^\circ/s$)
- filtr_c
 - fn* - brak filtracji cyfrowej
 - fs* - filtr uśredniający
 - fo* - filtr opóźniający
- filtr_a
 - x* - częstotliwość odcięcia filtra analogowego ($0 \leq x \leq 1000$)
- filtr_m
 - g* - jeśli występuje oznacza że użyto filtra mechanicznego, w przeciwnym wypadku badanie było przeprowadzone bez tego filtra
- sterowanie
 - t* - jeśli występuje oznacza, że użyto sterowania trapezowego, jeśli nie - skokowego

Przykładowa nazwa "a2k10fn200t.m" oznacza że badanie dotyczy 2-osowego akcelerometru MMA6270 z zadaną prędkością kątową wynoszącą 10bs, bez filtracji cyfrowej, z częstotliwością odcięcia filtra analogowego 200Hz, bez filtra mechanicznego przy sterowaniu trapezowym.

Skrypty uruchomieniowe pozwalają na podgląd wyników badań. Umożliwiają także przeprowadzenie kalibracji zera poprzez odpowiedni parametr wywołania oraz gwarantują odpowiednie skalowanie jednostek. Należy jednak pamiętać o wpisaniu - przy wywołaniu - odpowiedniego współczynnika skalowania. "1" dla badań bez filtra mechanicznego oraz "16" dla badań z tym filtrem. Stosuje się różne skrypty uruchomieniowe w zależności od badanego czujnika zgodnie z poniższym opisem:

- *pokaz_gyr.m* - podgląd wyników badań żyroskopu ADIS16100.
wywołanie: *pokaz_gyro(kalibracja, współczynnik)*;
kalibracja - 0 brak kalibracji zera, 1 kalibracja zera
współczynnik - 1 dla pomiarów bez filtra mechanicznego, 16 dla pomiarów z filtrem mechanicznym
- *pokaz_acc1L.m* - podgląd wyników badania akcelerometru MMA7455L przy zadanej prędkości liniowej
wywołanie: *pokaz_acc1L(kalibracja)*;
kalibracja - 0 brak kalibracji zera, 1 kalibracja zera
- *pokaz_acc1K.m* - podgląd wyników badania akcelerometru MMA7455L przy zadanej prędkości kątowej
wywołanie: *pokaz_acc1K(kalibracja, współczynnik)*;
kalibracja - 0 brak kalibracji zera, 1 kalibracja zera
współczynnik - 1 dla pomiarów bez filtra mechanicznego, 16 dla pomiarów z filtrem mechanicznym
- *pokaz_acc2L.m* - podgląd wyników badania akcelerometru MMA6270 przy zadanej prędkości liniowej
wywołanie: *pokaz_acc2L(kalibracja, współczynnik)*;
kalibracja - 0 brak kalibracji zera, 1 kalibracja zera
współczynnik - 1 dla pomiarów bez filtra mechanicznego, 16 dla pomiarów z filtrem mechanicznym
- *pokaz_acc2K.m* - podgląd wyników badania akcelerometru MMA6270 przy zadanej prędkości kątowej
wywołanie: *pokaz_acc1K(kalibracja, współczynnik)*;
kalibracja - 0 brak kalibracji zera, 1 kalibracja zera
współczynnik - 1 dla pomiarów bez filtra mechanicznego, 16 dla pomiarów z filtrem mechanicznym

Poprawne wyświetlenie wykresów wymaga wyszukania skryptu z badaniem, następnie skopiowania go do katalogu "Badania" (w to samo miejsce gdzie znajdują się skrypty uruchomieniowe). Skopiowany skrypt należy uruchomić poprzez kliknięcie na niego prawym przyciskiem myszy i wybranie "Run". Następnie należy wywołać w konsoli odpowiedni skrypt uruchomieniowy. Po odczekaniu krótkiej chwili powinny pojawić się wykresy.

Dodatek H

Przykładowe ćwiczenia laboratoryjne

H.1 Wpływ filtracji na wyznaczanie prędkości oraz przebytej drogi przy pomocy akcelerometru

W ćwiczeniu tym należy zbadać wpływ różnych filtrów na wyznaczanie prędkości oraz drogi platformy mobilnej BlueScreen V2. Wyznaczanie prędkości robota należy przeprowadzić poprzez scałkowanie sygnału zmierzonego przez akcelerometry, natomiast wyznaczenia drogi - poprzez podwójne całkowanie. W tym celu należy zebrać pomiary w sposób przedstawiony w dodatku F oraz przy użyciu, dołączonych na płycie CD, skryptów uruchomieniowych w środowisku Matlab, porównać wyniki z pomiarami z pozostałych czujników (dodatek G). Eksperymenty należy powtórzyć dla obu dostępnych akcelerometrów: MMA7455L i MMA6270. Pierwszy z nich nie wymaga użycia filtra analogowego. Należy przeprowadzić badania dla filtrów cyfrowych: uśredniającego, opóźniającego oraz bez filtracji cyfrowej dla dwóch różnych wartości prędkości liniowej V_{lin} . Podobnie należy przeprowadzić badania dla drugiego akcelerometru z uwzględnieniem trzech różnych wartości częstotliwości odcięcia filtra analogowego (np. 5Hz, 20Hz, 100Hz). Badania powinny być przeprowadzone na płaskiej (wypoziomowanej), gładkiej powierzchni. Pomiary należy zbierać podczas prostoliniowego ruchu robota w przód a następnie w tył.

Przebieg ćwiczenia:

- Zapoznać się z przygotowaniem stanowiska laboratoryjnego i obsługą robota BlueScreen V2 (dodatek F) oraz ze sposobem wyświetlania pomiarów w środowisku Matlab (dodatek G)
- Ustawić robota na pozycji startowej i przeprowadzić kalibrację mierzonego akcelerometru jedną z komend $ka1(1)$, $ka2(1)$
- Ustawić wybrany filtr cyfrowy (F_{off} , F_s , F_o).
- Ustawić wybraną częstotliwość odcięcia filtra analogowego ($ff(freq)$) - tylko MMA6270)
- Ustawić rodzaj sterownia na trapezowy, $tr(1)$
- Wyzerować pozycję kół oraz globalną pozycję komendami: $wp(0,0)$, $op(0,0,0)$
- Rozpocząć zapis do pliku (terminal - "StartLog") i uruchomić seryjny pomiar jedną z komend: $PA1$, $PA2$
- wystartować platformę komendą $go(V_{lin}, 0)$, po chwili zmienić kierunek komendą $go(-V_{lin}, 0)$
- zatrzymać robota komendą $stop$
- zatrzymać serię pomiarów (PS) i zakończyć zapis do pliku (terminal - przycisk "StopLog")
- korzystając z jednego ze skryptów uruchomieniowych $pokaz_acc1L.m$, $pokaz_acc2L.m$ wyświetlić wykresy oraz porównać wyniki dla różnych czujników. Sprawdzić wpływ kalibracji z poziomu skryptów uruchomieniowych. Skrypty wywoływać z parametrem *współczynnik* wynoszącym 16.

H.2 Wpływ filtracji na wyznaczanie modułu prędkości kątowej przy pomocy akcelerometru

W ćwiczeniu tym należy zbadać wpływ różnych filtrów na wyznaczanie modułu prędkości kątowej platformy mobilnej BlueScreen V2 przy pomocy akcelerometru. Wyznaczanie prędkości kątowej robota należy przeprowadzić dokonując obliczeń przedstawionych w rozdziale 2.3. W tym celu należy zebrać pomiary w sposób przedstawiony w dodatku F oraz przy użyciu, dołączonych na płycie CD, skryptów uruchomieniowych w środowisku Matlab, porównać wyniki z pomiarami z pozostałych czujników (dodatek G). Eksperymenty należy przeprowadzić dla akcelerometru MMA6270, wykorzystując filtry cyfrowe: uśredniający, opóźniający oraz bez filtracji cyfrowej dla dwóch różnych wartości prędkości kątowej V_{kat} oraz z uwzględnieniem trzech różnych wartości częstotliwości odcięcia filtru analogowego (np. 5Hz, 20Hz, 100Hz). Badania powinny być przeprowadzone na płaskiej (wypoziomowanej), gładkiej powierzchni. Pomiary należy zbierać podczas ruchu obrotowego robota w prawo a następnie w lewo.

Przebieg ćwiczenia:

- Zapoznać się z przygotowaniem stanowiska laboratoryjnego i obsługą robota BlueScreen V2 (dodatek F) oraz ze sposobem wyświetlania pomiarów w środowisku Matlab (dodatek G)
- Ustawić robota na pozycji startowej i przeprowadzić kalibrację mierzonego akcelerometru komendą $ka2(1)$
- Ustawić wybrany filtr cyfrowy (F_{off} , F_s , F_o).
- Ustawić wybraną częstotliwość odcięcia filtru analogowego ($ff(freq)$)
- Ustawić rodzaj sterownia na trapezowy, $tr(1)$
- Wyzerować pozycję kół oraz globalną pozycję komendami: $wp(0,0)$, $op(0,0,0)$
- Rozpocząć zapis do pliku (terminal - "StartLog") i uruchomić seryjny pomiar komendą $PK2$
- wystartować platformę komendą $go(0, V_{kat})$, po chwili zmienić kierunek komendą $go(0, -V_{kat})$
- zatrzymać robota komendą $stop$
- zatrzymać serię pomiarów (PS) i zakończyć zapis do pliku (terminal - przycisk "StopLog")
- wyświetlić wykresy korzystając ze skryptu $pokaz_acc2K.m$ oraz porównać wyniki dla różnych czujników. Sprawdzić wpływ kalibracji z poziomu skryptów uruchomieniowych. Skrypty wywoływać z parametrem $współczynnik$ wynoszącym 16.

H.3 Wpływ filtracji sygnałów na wyznaczanie orientacji platformy mobilnej za pomocą żyroskopu

W ćwiczeniu tym należy zbadać wpływ różnych filtrów cyfrowych na wyznaczanie orientacji platformy mobilnej BlueScreen V2. Wyznaczanie orientacji robota należy przeprowadzić poprzez scałkowanie sygnału zmierzonego przez żyroskop. W tym celu należy zebrać pomiary w sposób przedstawiony w dodatku F oraz przy użyciu, dołączonych na płycie CD, skryptów uruchomieniowych w środowisku Matlab, porównać wyniki z pomiarami z koderów kwadraturowych i optycznego czujnika przemieszczenia (dodatek G). Eksperymenty należy przeprowadzić dla żyroskopu ADIS16100 z użyciem różnych filtrów cyfrowych: uśredniającego, opóźniającego oraz bez filtracji cyfrowej dla dwóch różnych wartości prędkości kątowej V_{kat} . Badania powinny być przeprowadzone na płaskiej (wy poziomowanej), gładkiej powierzchni. Pomiary należy zbierać podczas ruchu obrotowego robota w prawo a następnie w lewo.

Przebieg ćwiczenia:

- Zapoznać się z przygotowaniem stanowiska laboratoryjnego i obsługą robota BlueScreen V2 (dodatek F) oraz ze sposobem wyświetlania pomiarów w środowisku Matlab (dodatek G)
- Ustawić robota na pozycji startowej i przeprowadzić kalibrację mierzonego żyroskopu komendą $kag(1)$
- Ustawić wybrany filtr cyfrowy (F_{off} , F_s , F_o).
- Ustawić rodzaj sterownia na trapezowy, $tr(1)$
- Wyzerować pozycję kół oraz globalną pozycję komendami: $wp(0,0)$, $op(0,0,0)$
- Rozpocząć zapis do pliku (terminal - "StartLog") i uruchomić seryjny pomiar komendą PG
- wystartować platformę komendą $go(0, V_{kat})$, po chwili zmienić kierunek komendą $go(0, -V_{kat})$
- zatrzymać robota komendą $stop$
- zatrzymać serię pomiarów (PS) i zakończyć zapis do pliku (terminal - przycisk "StopLog")
- wyświetlić wykresy korzystając ze skryptu $pokaz_gyro.m$ oraz porównać wyniki dla różnych czujników. Sprawdzić wpływ kalibracji z poziomu skryptów uruchomieniowych. Skrypty wywoływać z parametrem *współczynnik* wynoszącym 16.

Dodatek I

Zawartość płyty CD

- Elektronika/Firmware - kod źródłowy robota dla MC68332
- Elektronika/PCB_Eagle_5.4.0/Biblioteki_Eagle - zestaw bibliotek z elementami wykorzystanymi w robocie
- Elektronika/PCB_Eagle_5.4.0/Modul_nawigacyjny_INS - projekt płytki modułu nawigacyjnego
- Elektronika/PCB_Eagle_5.4.0/Płyta_główna - projekt płyty głównej robota
- Oprogramowanie/RS_Comm.exe - program dla Windows, umożliwiający łatwe sterowanie robotem
- Oprogramowanie/Terminal.exe - terminal umożliwiający sterowanie robotem oraz pobieranie pomiarów (Windows)
- Oprogramowanie/makra.tmf - plik programu "Terminal.exe" zawierający makra z komendami robota
- Oprogramowanie/USB_Bluetooth_Adapter - sterowniki do adaptera Bluetooth
- Dokumentacje - ważniejsze dokumentacje oraz noty katalogowe związane z robotem
- Badania - pliki programu Matlab zawierające wyniki wszystkich przeprowadzonych badań
- Rysunki_Corel_Draw_13(X3) - rysunki użyte w pracy w formacie wektorowym
- Tekst - tekst pracy